SEISMIC VERIFICATION
SEISMIC VERIFICATION
SEISMIC VERIFICATION
SEISMIC VERIFICATION
SEISMIC VERIFICATION
SEISMIC VERIFICATION
SEISMIC VERIFICATION
SEISMIC VERIFICATION
SEISMIC VERIFICATION
SEISMIC VERIFICATION
SEISMIC VERIFICATION

86-02474/

Seismic Verification

"The graphic on the cover page represents the ongoing dialogue on arms control and disarmament issues in Canada and between Canadians and the world community."

On peut se procurer une version française de cette étude en écrivant à l'adresse suivante:

Direction du contrôle des armements et du désarmement
Ministère des Affaires extérieures
Tour A, 6e étage
125, promenade Sussex
Ottawa (Ontario)
Canada
K1A 0G2

© Minister of Supply and Services Canada 1986

Cat. No. E2-115/1986E
ISBN 0-662-14528-3
ISSN 0830-923X

Design:
David Nethercott
& Associates

Table of Contents

Chapter One	Introduction	9
Chapter Two	The Physical Setting: "The Earth as a Sounding Board"	15
	Body Waves	16
	Surface Waves	20
	"Different Signatures"	20
	Detection and Identification	21
	Peaceful Nuclear Explosions	23
Chapter Three	A History of Canadian Involvement in Seismic Verification	25
	Scientists and Diplomats	26
Chapter Four	International Efforts	31
Chapter Five	Seismic Data Exchange	33
Chapter Six	Remaining Obstacles	37
	Evasion	38
	Cavity De-coupling	38
	The Problem of Discrimination	40
	10 000 Shocks a Year	40
	Practicality	42
	The Trend Towards Smaller Nuclear Weapons	44
	One Solution: Unmanned Stations	44
Chapter Seven	The Road Ahead	49
	The Bottom Line	50

Figures

1	Definition of verification	11
2	Number of nuclear explosions 1945–1983	13
3	Map of nuclear test sites	14
4	Cross-section of the Earth showing paths of seismic waves	17
5	The seismograph	18
6	Schematic diagram of a seismograph installation	19
7	Seismograms of body and surface waves, short and long periods	22
8	Number of announced peaceful nuclear explosions	24
9	The Dominion Observatory Building	27
10	Yellowknife seismic array, N.W.T.	29
11	Global telecommunications system and Canadian participation in the 1984 International Seismic Data Exchange	35
12	Cavity created by the USAEC test explosion (GNOME)	39
13	Overall view of surface facilities at Ground Zero	41
14	Seismic magnitude as a function of explosion yield	43
15	Earthquake occurrence worldwide	45
16	Prototype of unmanned United States surface seismograph station	47
17	Regional Seismic Test Network (RSTN)	48
18	Highlights of international negotiations and initiatives aimed at banning and regulating the use of nuclear weapons	51

Introduction

Chapter One

Introduction

Planet Earth, no matter how solid it may sometimes seem, is really a gigantic sounding board. By applying appropriate "ears" to the ground, one can sense vibrations caused by significant events that may have occurred 10 000 kilometres away.

The noises most commonly heard are natural in origin — the results of earthquakes, the pounding of waves on distant shores and weather noise — but humans make their own contributions through daily activities such as mining, construction and the operation of trains and motor vehicles.

The most dramatic of all noises of human origin, however, derives from underground nuclear explosions, which may cause shocks in the Earth's crust comparable to those of sizeable earthquakes.

The instruments that are used to detect such events are called seismographs. These sensitive devices record both vertical and horizontal movements of the Earth's surface that may not be sensed by human beings. The seismograph may be the most important means of verification for a treaty prohibiting all underground testing of nuclear weapons.

When a sufficiently large number of suitably located seismographs sense the same event, it is often possible to compare their findings and determine with a fair degree of certainty the nature of the event causing the shock waves, its location, its depth below the surface and the approximate amount of energy involved.

Canada has a long tradition in geophysics and in the monitoring of earthquakes. Canadian experts who have spent their careers studying such matters believe that Canada has a unique role to play in the development of reliable verification systems that would be an essential prerequisite to the conclusion of any comprehensive test ban treaty. Canada's size, geographical position (see Figure 3), and geological similarity with the great continental rock mass that underlies much of Europe and Asia, as well as our own technical expertise, make this possible.

Figure 1 Definition of verification

"Verification is the establishment of truth or correctness of (something), by examination or demonstration"
(Concise Oxford Dictionary)

No single issue in the 1980s is likely to be of greater significance in international arms control and disarmament negotiations than *verification*. Particularly in an era of increased suspicion and uncertainty, nations are unlikely to accede to treaties affecting their own national security without some adequate means of assurance that other signatories will, in fact, be living up to the terms of the agreement. In simple terms, *verification* is the means by which such assurance is gained. Whether it is through the use of consultative mechanisms, photo-reconnaissance satellites or on-site inspections, the ability to agree upon an effective system of verification can mean the success or failure in the negotiation of an arms control agreement.

Can such systems be developed to the point where they will inspire a reasonable degree of confidence, and thus pave the way to an end to nuclear testing?

Canadian seismic experts who have been involved in the Geneva negotiations on this subject for several decades stress that the problem is a highly complex one that still involves many unknowns on the technical side.

Furthermore, they say the problem can be solved only in an atmosphere of genuine international goodwill that includes a willingness on the part of all nations to make more national seismic information available than in the past. Additional concessions, such as permitting the establishment of an adequate number of international listening stations within their national borders, may also be necessary.

As part of the Government's continuing commitment to keeping Canadians informed on various arms control and disarmament issues, this brochure will examine the present state of technological capability for monitoring an underground test ban, explore the potential for further improving this capability and describe Canadian contributions to this arms control effort.

Figure 2 Number of nuclear explosions 1945-1983.

A total of 1 469 nuclear explosions have been carried out on our Earth since 1945 according to current figures available from the Swedish Defence Research Institute. Of these explosions, 461 have been carried out in the atmosphere and 1 008 underground.

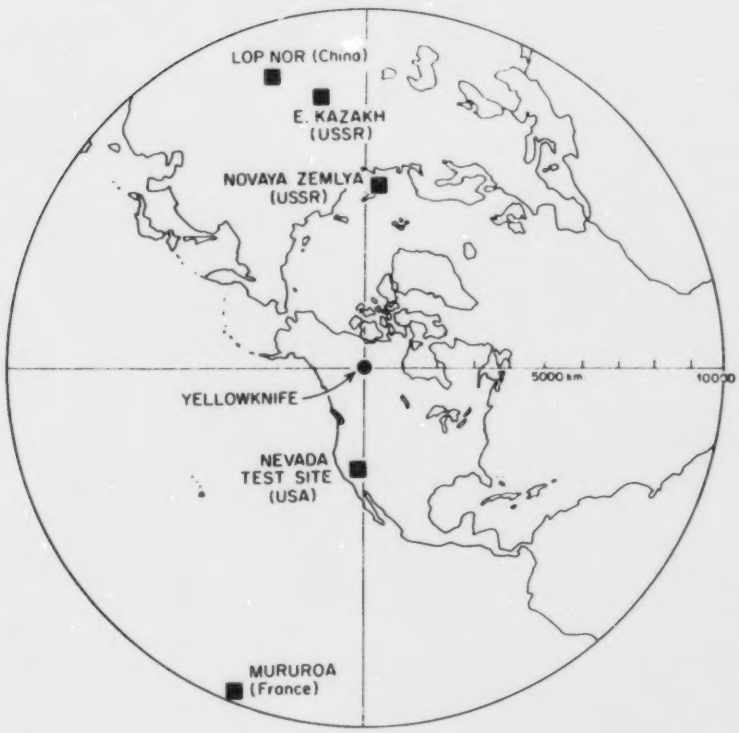
The following table shows nuclear explosions by country of origin:

	Atmosphere	Underground	Total
France	45	75	120
India	—	1	1
China	22	5	27
Soviet Union	161	368	529
United Kingdom	21	15	36
United States	212	544	756
	461	1 008	1 469

The table shows that the United States has carried out the greatest number of nuclear tests and that the two superpowers together have accounted for 87 per cent of the total. In the last few years the USSR has conducted the most nuclear tests, while the total number of tests has been comparatively constant at an average of 51 explosions per annum, i.e., about one test a week.

Seismic evidence indicates that most, if not all, nuclear explosions today are carried out underground. China has not adhered to the Partial Test Ban Treaty and has carried out occasional atmospheric tests, the latest in October 1980. Nor has France adhered to the treaty, although it has officially declared that it will not carry out nuclear weapons testing in the atmosphere. No such tests have been carried out by France since 1974.

Figure 3 Map of nuclear test sites. The Yellowknife seismograph array is within 10 000 km of all principal underground nuclear explosion test sites.



The Physical Setting:
"The Earth as a Sounding Board"

Chapter Two

The Physical Setting: "The Earth as a Sounding Board"

To appreciate the nature of the challenge that scientists face in this vital area of arms control, it is useful to visualize the Earth as a sphere with an approximate radius of 6 500 kilometres and a circumference of about 40 000 kilometres. It consists of three main components: the crust, the mantle and the core (see Figure 4).

The discontinuity between the mantle of the Earth and its liquid core presents an effective barrier to the transmission of most seismic waves, either reflecting them upwards or deflecting them into the Earth's core. Thus, the core of the Earth casts a "shadow" which prevents listening stations from clearly detecting certain seismic waves at distances beyond about 10 000 kilometres.

Another limitation stems from the fact that different geological formations transmit seismic waves with different degrees of efficiency. Hard granitic rocks and salt deposits, for example, transmit high frequency shocks comparatively well, whereas tuff (a rock composed of compacted volcanic fragments) transmits seismic waves poorly. Sedimentary deposits, often of sandy or muddy origin, are even less efficient transmitters of seismic waves. The result is that the recorded size of the seismic waves produced by a given event, when measured some distance away, could vary by a factor as large as 10, depending on the type of terrain in which it occurred.

When a seismic event occurs in the Earth as a result of an earthquake or an underground explosion, it produces different types of seismic waves, of which the two main categories are body waves and surface waves.

Body Waves

Body waves travel through the "body" or mantle of the Earth. The fastest travelling body wave is the P (primary) wave, which is much like a sound wave travelling in the solid Earth. The second type of body wave is the S (shear) wave, which travels at about 60 per cent of the velocity of a P-type body wave.

Figure 4 Cross-section of the Earth showing paths of seismic waves. Shadow zone is caused by waves deflected by the Earth's core. The time delay between direct P and the P wave reflected from the surface (pP) is indicative of the depth of the seismic event.

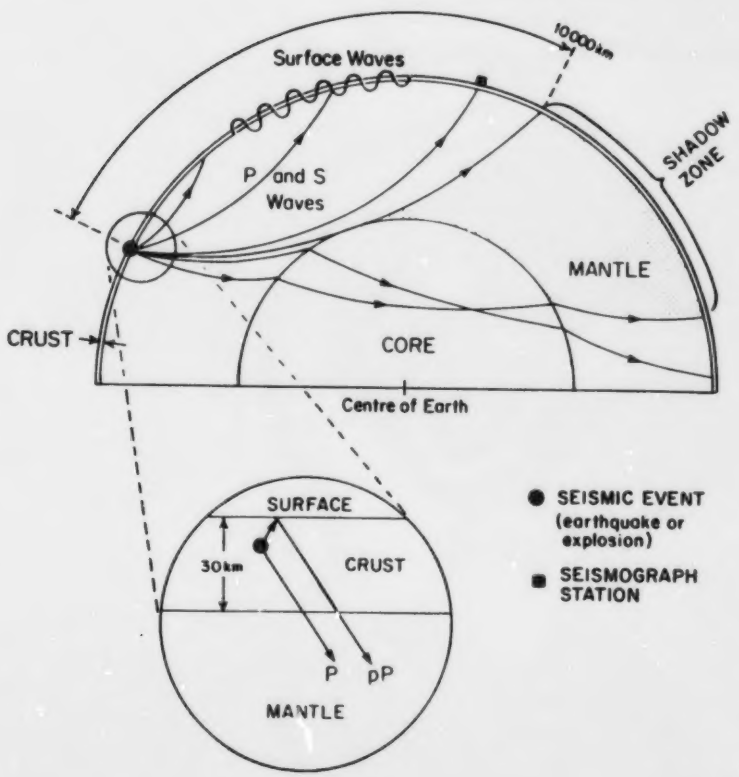


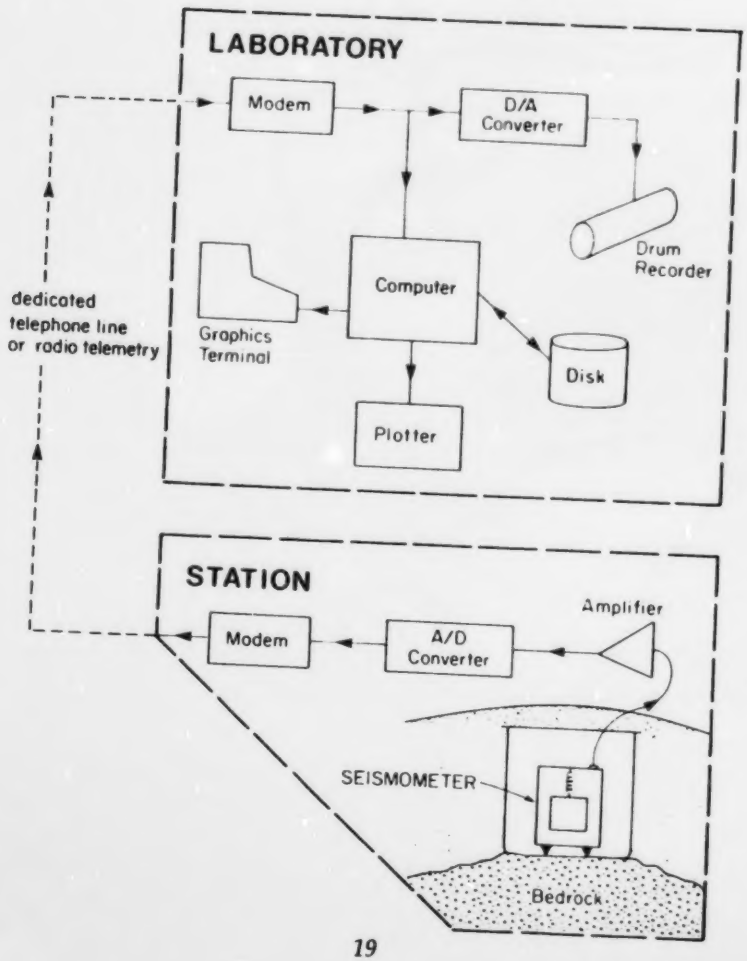
Figure 5 The seismograph. The instrument used to detect seismic waves is called a seismometer (as illustrated on page 19), and usually takes the form of a canister, about 20 centimetres in diameter and 30 centimetres high, lined with a coil of wire. Inside the coil and suspended from the top of the canister by a spring, is a permanent magnet, free to move up and down within the coil.

The coil-lined canister sits on solid rock and any Earth vibration will cause it to move up and down, but the magnet, being somewhat massive, will tend to stay where it is. This relative motion will induce a weak electric current in the coil that can be measured and recorded as a wave form on a moving roll of paper or on magnetic tape.

The current induced in the coil will be proportional to the movement of the magnet within the coil. The natural period of vibration of the spring is that of an average P (primary) wave, or about one second. However, by tuning the electric amplifier that records these movements, one can record seismic waves with frequencies of up to 100 cycles per second.

Although the seismometer is a relatively small and compact device, a seismograph installation may include any number of seismometers, as well as a data laboratory, a computer system and assorted electronic equipment to digitize data for more powerful analysis.

Figure 6 Schematic diagram of a typical modern digital seismograph installation.
(A–analog, D–digital).



All body waves travel at a velocity proportional to the density of the medium in which they are travelling. They tend to follow the fastest path and therefore pursue routes deep in the Earth, where the material is more dense. P-type body waves have a cycle of about one second. It is these higher frequency body waves that are felt by humans and cause damage in the region of a strong earthquake. S-type body waves, which may be recorded by seismographs in the case of earthquakes, are usually absent or of little importance in the case of explosions.

Surface Waves

Surface waves, (also called Rayleigh waves, after the first scientist to describe them) behave like ripples on the surface of a pond. They travel much more slowly than body waves and have a much lower frequency of vibration — surface waves have a period of about 20 seconds — yet have an important part to play in detection seismology, particularly when it comes to identifying the source of an event.

"Different Signatures"

When an Earth shock of sufficient magnitude occurs within the range of a given listening station, the first signal to be recorded will be a P-type body wave. This may be followed by other P waves that follow different and slower routes, and then, particularly in the case of a deep subterranean earthquake, by what are known as pP waves which first travel upwards and then are reflected downwards again by the Earth's surface.

Perhaps 20 or 30 minutes later, if the shock is a distant one, low frequency surface waves will probably be recorded. The difference in the arrival times of P-type body waves and the surface waves will usually provide an approximate estimate of the distance of the seismometer from the source event.

Whereas an earthquake usually provides a complicated assortment of seismic waves because of the large area of geologic movement involved, explosions provide relatively simple signatures. As a result, to the experienced seismologist the waves created by explosions tend to appear very different from those of earthquakes. Those of explosions, for example, are usually of higher frequency and shorter duration. Also, the initial P-type body wave from an explosion tends to be larger than that caused by an earthquake.

It is thus relatively easy for an expert to distinguish between earthquakes and explosions of large magnitude. Problems arise, however, in making distinctions at low magnitudes. Dr. Robert North, senior research seismologist at the Earth Physics Branch of Energy, Mines and Resources Canada, explains that two difficulties are experienced in interpreting the records of smaller events: first, there is a tendency for the seismic wave signals to get buried in background noise such as ocean movements or wind; and second, small explosions and small earthquakes tend to look alike on seismograph records.

Detection and Identification

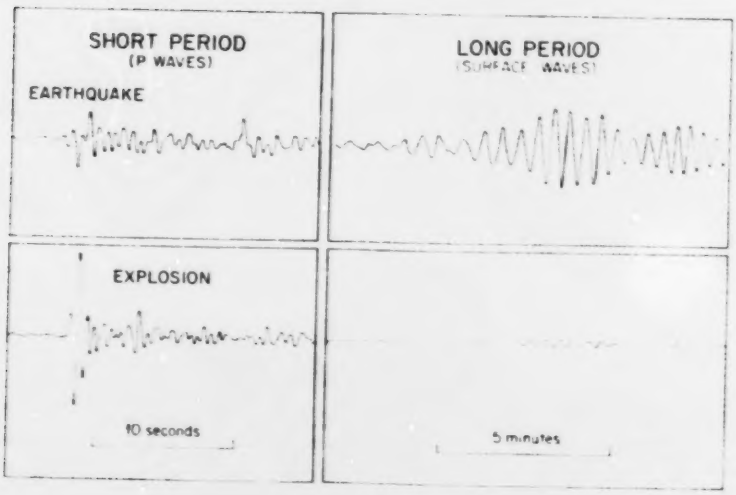
Any verification program involves two distinct processes: (i) detection, or the recognition that a seismic event has taken place and where; and (ii) identification of the nature of the event.

In the opinion of Dr. Peter Basham, head of seismic verification research at the Earth Physics Branch, Department of Energy, Mines and Resources, the threshold at which there is confidence in the ability to detect and identify a nuclear explosion against background Earth noise is the key issue in seismic verification as far as drafting any hypothetical treaty is concerned.

Usually, a number of stations will record a specific event. The more stations that do, the better the information will be. Furthermore, if the stations are suitably placed in a geographical sense, then it should be possible to estimate where the event took place with an accuracy of between 10 and 30 kilometres. Once the location has been established, highly sophisticated analysis of the data by a seismologist may be necessary to establish the nature of the event, particularly if the signals are detected just above the level of background noise.

It may also be important to determine the energy released in an explosion, particularly if a treaty (in the absence of a complete ban on testing) establishes a threshold limit on test size. When an event has been identified as being of nuclear origin and it comes to determining the energy released, adjustments are made to the seismic readings (calibration) on the basis of seismic data previously collected for the same region. Ideally, such data would be provided by the country of origin; however, a problem exists be-

Figure 7 Seismograms of body and surface waves, short and long periods. Recorded at the station in Glen Almond, Quebec from an Earthquake and an explosion. Both took place in the USSR in October 1984 at a distance of approximately 8 000 km. As shown by these seismograms, the most important difference between the signals from the two types of events is the much smaller surface waves produced by the explosion.



cause some countries, notably the USA, have provided a great deal of data while others have provided little or none.

The USSR, for example, has its own national seismic network, used for detection of earthquakes within its territory and as part of the global earthquake detection network. While the West has had access to some of these data, the USSR has never released seismic data on any nuclear explosion conducted at their test site.

Peaceful Nuclear Explosions

In 1976 the USA and USSR signed the Peaceful Nuclear Explosions Treaty which requires that both nations share information and access to sites of explosions used for peaceful purposes. Pursuant to this agreement both superpowers have released much information about the purpose of such explosions. For example, although the USA discontinued its use of peaceful nuclear explosions in 1973, they had generally been used until that time to create potential reservoirs for petroleum products or to explore the possibility of extracting heavy oils. In the case of the USSR, purposes have included:

- Excavating surface canals;
- Water diversion;
- Creating cavities for the storage of petroleum products; and, on one occasion;
- Extinguishing an oil-well fire.

Under the agreement, both countries also agreed to share data relating to the energy yields of these explosions, as well as data on the type of rock in which the explosions are carried out. Such information is needed in the calibration and, consequently, the overall verification process. To date, these data have been made liberally available by the USA and it is hoped that similar data will soon be released by the USSR

Figure 8 Number of announced peaceful nuclear explosions (held outside ordinary testing sites).

Year	USSR	USA	India
1961		1	
1962		2	
1963		4	
1964		8	
1965		3	
1966	1	7	
1967		4	
1968	1	4	
1969	4	2	
1970	3	1	
1971	7	1	
1972	9		
1973	5	3	
1974	3		1
1975	2		
1976	2		
1977	5		
1978	7		
1979	8		
1980	3		
1981	5		
1982	16		
1983	13		
Total	**94**	**40**	**1**

A History of Canadian Involvement in Seismic Verification

Chapter Three

A History of Canadian Involvement in Seismic Verification

Scientists and Diplomats

To sharpen the Canadian capability to monitor underground tests, an inter-governmental program was recently initiated wherein the Department of External Affairs' Arms Control and Disarmament Verification Research Unit has provided funding to the Earth Physics Branch of the Department of Energy, Mines and Resources for additional personnel and hardware. As part of this program, technical experts from Energy, Mines and Resources work closely with diplomats of External Affairs on international negotiations regarding treaties that would limit or prohibit testing of nuclear weapons.

The responsibilities of the Earth Physics Branch include operation of the Canadian Seismograph Network. With the data from this network, the branch makes a continuing contribution to global earthquake monitoring by sharing Canadian data with international agencies. The branch's primary purpose, however, is to monitor Canadian earthquakes and study seismic risk in Canada.

Canadian seismic experts have been involved in arms control efforts since it was realized that seismology could contribute to the monitoring of underground explosions. In 1958-59, for example, the Earth Physics Branch was represented in a conference of experts that met in Geneva to discuss the possibility of seismic monitoring of a future test ban treaty.

Dr. Peter Basham, whose name is now well known in scientific literature on seismological matters, recalls that the single most significant event that brought experts from around the world together on that occasion was the first recorded underground testing of a nuclear device in Nevada in 1957. Its reverberations were detected by seismographs to a much greater distance than had ever been anticipated.

Although there had been negotiations between the USA and the USSR in the late 1950s, the 1958 Geneva meeting of experts was the first significant meeting of East and West to discuss seismic verification at a technical level. Those taking part concluded that an underground test ban treaty could be monitored by the combined efforts of 150–170 seismograph stations distributed throughout the world.

Figure 9 The Dominion Observatory Building on Carling Avenue in Ottawa now houses the Earth Physics Branch of the Department of Energy, Mines and Resources.

Stations in existence at the time were designed purely for the purpose of detecting earthquakes and research started immediately to determine the type of improved seismograph that could be useful in monitoring a hypothetical test ban treaty.

The United Kingdom was first off the mark. The UK Atomic Energy Authority started experimenting with cruciform arrays of seismographs, basically using the then-developing radio antenna theory to detect seismic waves. These arrays could be "steered" electronically to reduce earth noise and improve detection. They were also able to determine an approximate direction and distance (and thus location) of a seismic event.

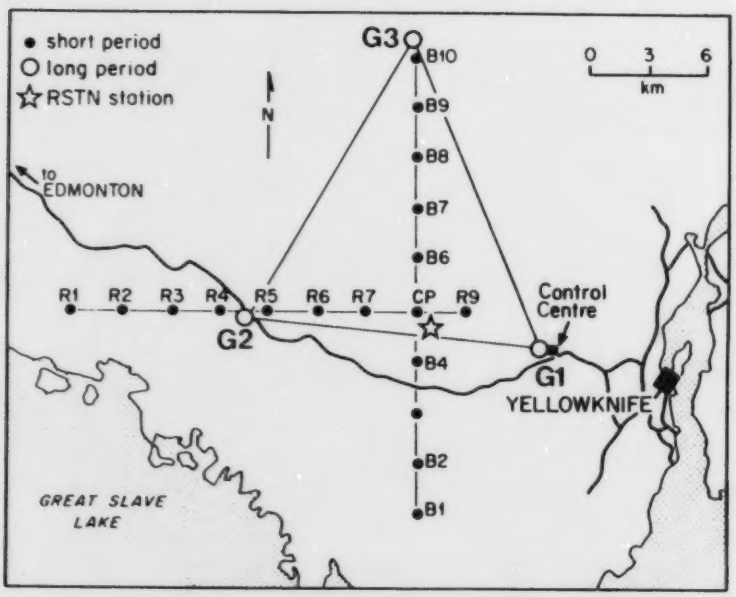
In the early 1960s the British built four of these arrays, all of which are still operating, in Scotland, India, Australia, and the Canadian Northwest Territories near Yellowknife. The Yellowknife array comprised 19 seismometers and had four arms, each about 10 kilometres long.

The original Yellowknife array was administered by the Canadian Defence Research Board until 1962, when responsibility was transferred to the Department of Energy, Mines and Resources. The array was much improved over the years and is now computerized. It forms a small but significant part of a continent-wide network of Canadian seismograph stations now numbering more than 100.

The scientific literature demonstrates that during those early years, the small Canadian group of experts made a substantial contribution to the general understanding of what reliable detection and identification of distant seismic events entails. During the past 10 years, the research of this group has become increasingly linked to the highly technical international discussions on verification of a test ban treaty. These are conducted mainly in Geneva, with scientists of Energy, Mines and Resources acting on behalf of the Department of External Affairs.

One indication of the Canadian interest in achieving an effective test ban treaty was our sponsorship in the United Nations General Assembly in the late 1960s of a key resolution asking all countries to deposit with the UN information about the capabilities of their respective seismic observatories. This was so that an assessment could be made of their capacity to contribute to a test ban moni-

Figure 10 Yellowknife seismograph array, N.W.T. The short period seismometers, separated by 2.5 km, form an irregular cross; the long-period seismometers form a triangle about 16 km on a side. Seismic data from the seismometers are transmitted to the Regional Seismic Test Network (RSTN) control centre in Albuquerque, New Mexico by radio telemetry.



toring network. Large volumes of material poured into the UN headquarters in New York and was analysed with Canadian help. A paper by Basham and Whitham of the Earth Physics Branch summed up the results and concluded that, with the network then existing, there was a 90 per cent probability of detecting any seismic event of Richter magnitude 4.5 in the northern hemisphere. However, there was much less confidence in the ability to identify correctly whether that same event was an earthquake or an explosion. An event of such magnitude would be equivalent to the detonation of a 3–10 kiloton explosive in a hardrock situation.

Capability for detection in the southern hemisphere, which is 85 per cent ocean, would be much less because of the paucity of good seismograph stations. The Canadian report contained a number of recommendations on how this detection capability might be improved and further papers addressed the question of how to improve estimations of the yield of remote events.

International Efforts

Chapter Four

International Efforts

In 1976 the Conference of the Committee on Disarmament in Geneva gave the Group of Scientific Experts its first mandate. The Group was asked to specify the technical features of a possible international seismic data exchange system and to provide factual results and analysis of data exchange methods.

The key words here are "international seismic data exchange." Equally important is an understanding of what the mandate does not encompass. The Group is not, for example, intended to design or develop an international system to monitor compliance with any hypothetical treaty. Rather, its objective is to facilitate verification by any interested state through a co-operative exchange of relevant seismic data.

In other words, what the Geneva Group has been doing since 1976 is discussing the technical and seismological means to achieve such an exchange of data among participating countries. The system, as now devised, would make data available to any participating country desiring it. Verification would remain a national responsibility.

Members of the Group of Scientific Experts meet in Geneva for two weeks twice each year. As a result of their initiatives, international experiments were conducted in 1980, 1981 and 1984 to test and improve a key element in worldwide monitoring, that of speedy international data exchange. By far the most important of these was the International Seismic Data Exchange experiment, conducted on a worldwide basis from October 15 to December 15, 1984.

Seismic Data Exchange

Chapter Five

Seismic Data Exchange

As in the case of the experiments sponsored by the Group of Scientific Experts in 1980 and 1981, the results of the 1984 International Seismic Data Exchange experiment emphasized the importance of reliable and speedy communication. The transmission network used was that of the World Meteorological Organization, known as the Global Telecommunications System. This data link was originally intended merely for the international exchange of weather data but for about 10 years the World Meteorological Organization has allowed it to be used for "other environmental data." Within this context, six or more countries have been making routine use of it for the exchange of seismic data for global earthquake monitoring.

In view of the quantity of data envisaged, some fears were expressed that the Global Telecommunications System would be brought to its knees by the flood of additional data involved in any comprehensive global seismic experiment. This did not occur, however, partly as a result of restricting seismic traffic to off-peak hours.

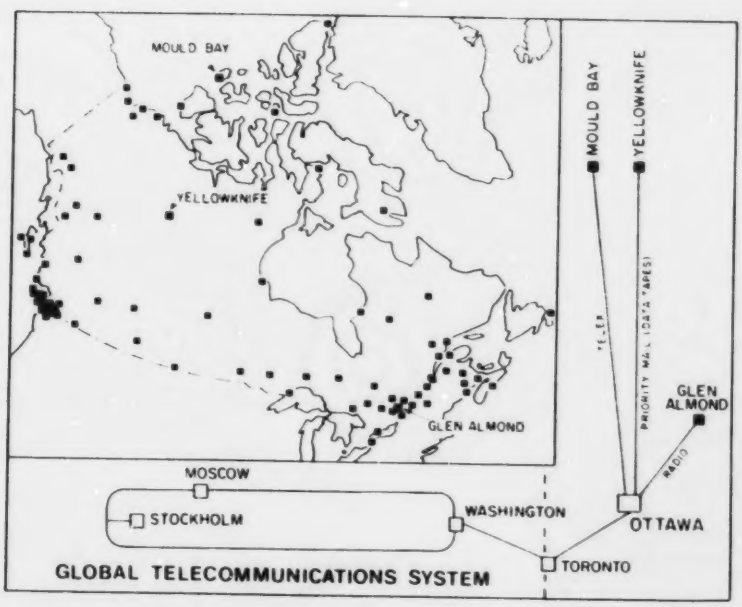
The program for the experiment was very well planned by the Group of Scientific Experts and an attempt was made to get as many countries as possible to take part. Three states, the USA, the USSR and Sweden, agreed to allow their national seismic computing facilities to act as experimental international data centres. More than 30 countries and 70 seismograph stations took part in the experiment.

Each station tried to measure certain agreed parameters recorded by their instruments for every seismic event. These data were then transmitted in a coded format via the Global Telecommunications System. International data centres in Washington, Moscow and Stockholm received the data and produced seismic event bulletins. These bulletins were transmitted to participating states within five days.

Of the more than 100 seismograph stations that Canada operates, three were chosen to take part: the Yellowknife array; Glen Almond, Quebec, about 50 kilometres north-east of Ottawa; and Mould Bay in the Canadian Arctic.

An important aim of the experiment was to determine how many of the data were circulated throughout the entire network and how many were lost. Canada compiled its own statistics on the experiment and took part in an international assess-

Figure 11 Global telecommunications system and Canadian participation in the 1984 International Seismic Data Exchange. Canadian seismograph stations are indicated in black; three stations shown on the right contributed to the data exchange experiment.



ment by the Group of Scientific Experts in Geneva. The extent of the overall Canadian contribution can be judged from the fact that its three stations provided between 10 and 15 per cent of the total data collected from some 70 stations.

Preliminary results of this large and highly successful operation show that while great strides have been made in the past 10 or 15 years, particularly in the real-time computerized analysis of data, there is still a long way to go in applying the latest data processing techniques to handle the huge quantities of information that would be generated on a day-to-day basis by an international data exchange system of this type.

Remaining Obstacles

Chapter Six

Remaining Obstacles

Evasion
The detection capability of a seismograph network in any area is heavily dependent on the strength of the signals received and the level of background Earth noise.

An additional concern is that the detection and identification of underground explosions can often be evaded or interfered with by several possible methods:

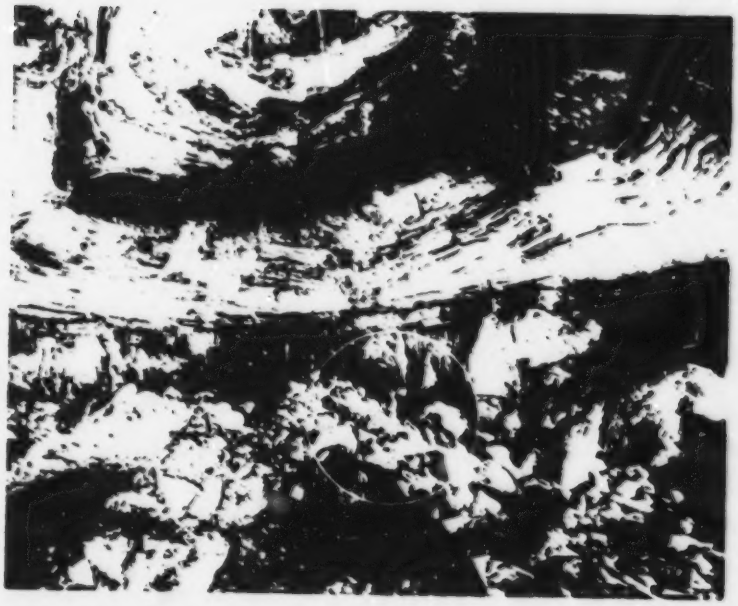
- Keeping seismic signals below the level of background Earth "noise";
- Testing in an earthquake-prone zone or creating seemingly "normal" noises at the same time to mask any explosion;
- Selecting a site so that the signal will pass through an absorbent region of the Earth's crust; or
- Partial or complete "de-coupling" of the explosion from its immediate solid surroundings, by detonating the device in a large artificial cavern.

Even assuming the establishment of an extensive seismograph network within the USSR, it must be accepted that the detonation of a device with a yield of 0.1 kiloton (which is equivalent to 100 tons of chemical explosive) will probably go unnoticed, even without resort to subterfuge. By suitable manipulation, such as cavity de-coupling mentioned above, that figure of 0.1 kiloton could be further increased by a factor of 50 to 100, making the test seem only one-hundredth as large as it is.

Cavity De-coupling
The USA was the first country to report the phenomenon of cavity de-coupling. In the 1960s the USA conducted large nuclear and chemical tests in underground salt domes, the results of which suggested that a cavity 50 metres in radius could fully muffle a five-kiloton explosion.

Such a technique might fully muffle an explosion several times larger if the cavity were created in a stiffer medium, such as granite. Although a single spherical underground cavity of so great a size would be difficult to excavate and might soon collapse because of damage to the surrounding rock, an alternate approach that has been used successfully is to increase the effective size of the chamber by connecting it to a tunnel network.

Figure 12 Cavity created by the United States Atomic Energy Commission (USAEC) test explosion (GNOME) detonated 1 200 feet underground on December 10, 1961. The cavity measured 160-170 feet in diameter and 60-80 feet deep, and was formed by a nuclear detonation with a yield of approximately three kilotons (courtesy of Lawrence Radiation Laboratory, Livermore, California).



Since satellite surveillance has been suggested by some countries as a complementary means of verifying compliance with a nuclear test ban treaty, it should be mentioned that the outward and visible signs of such an evasion operation may offer little of significance for a satellite to see. The accompanying aerial photograph of a surface facility used in a USA underground nuclear experiment shows that the surface installations for underground nuclear explosions are similar to those for conventional mining or other large-scale industrial activities.

The Problem of Discrimination

Once seismic waves have been detected, the source must be identified as an earthquake, a chemical explosion or a nuclear explosion. The decisive factors will include location and depth below the surface of the Earth, taking into account the fact that the limit of practical drilling capability at present is about 10–15 kilometres.

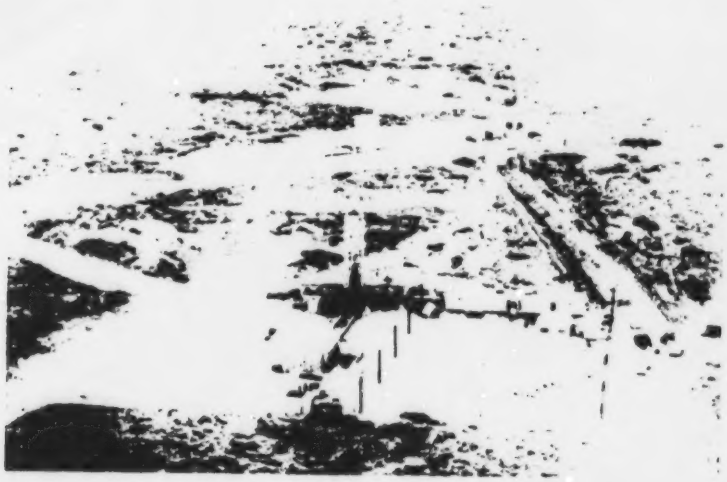
Surface location is also important: seismic events occurring in some locales, such as the ocean floor, are unlikely to be man-made explosions.

It must also be borne in mind that many areas may seem to be seismically inactive because high magnitude events may occur only rarely. However, those areas may be quite active in terms of events of lower magnitudes. Parts of Canada and the USA, for example, may register only one earthquake of Richter magnitude 4.5 in a decade, yet may sustain an average of one shock a day in the range of Richter magnitude 2.0–3.9 that would go unrecorded, except by local networks. The same is presumably true for the many granitic regions in the USSR.

10 000 Shocks a Year

Generally speaking, an additional Richter magnitude of 0.5 (equivalent to trebling the size of the shock, see Figure 14) is needed, above the detection threshold, before a pronouncement can be made that a specific event is an explosion. With some 10 000 earthquakes of magnitude greater than Richter 4 occurring around the world each year and countless thousands of smaller events, the challenge of identification is a formidable one.

Figure 13 Overall view of surface facilities at Ground Zero after test explosion, GNOME, December 11, 1961, Carlsbad, New Mexico (courtesy of Borden, Reynolds Electrical & Engineering Company Inc.).



The severity of a seismic event is usually expressed in terms of an open-ended scale, named after its inventor, Dr. Charles Richter, in which each successive number represents an additional factor of 10 in the size of the event.

For a hypothetical threshold of Richter 2.7–3.2 and a network of 25–30 regional seismograph stations deployed by common consent throughout the USA and the USSR, only 80 per cent of all recorded events would eventually be categorized as being of nuclear or natural origin. That leaves much scope for false alarms and the possibility that if nuclear tests of a very small or sub-kilotonne range were conducted, they might not be identified.

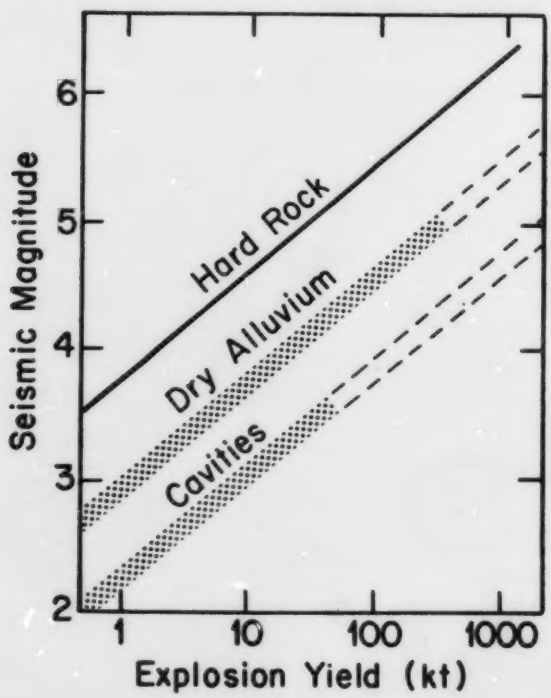
On the basis of these kinds of uncertainty, some authorities assert that a verifiable comprehensive test ban treaty is impossible. Such critics say that no monitoring technology currently foreseen can offer absolute assurance that very small-yield, illicit nuclear explosions would not go unnoticed.

This gap in the ability to detect and identify underground nuclear explosions emphasizes the need to press for adequate in-country detection networks and underlines the desirability of provisions for on-site inspections.

Practicality

Scientists are quick to stress that quite apart from detecting and identifying underground tests with a degree of precision, there exists another major consideration: *practicality*. It is no exaggeration to say that, within the range of any given seismograph station, many thousands of events will occur in the course of a year. The process of monitoring and analysing all of them and re-analysing suspicious events in the context of additional data from other sources would be horrendous, notes Dr. Basham. But many still point out that, if the achievement of this objective could discourage further testing of nuclear weapons, it might still be worthwhile.

Figure 14 Seismic magnitude as a function of explosion yield for different geological environments based on data from the Nevada Test Site. As the figure below illustrates, it takes approximately 10 times the explosion yield to produce a shock wave one unit greater on the Richter scale.



The Trend Towards Smaller Nuclear Weapons

The importance of effectively monitoring tests of small-yield devices must be viewed in relation to three important recent developments in advanced weapons technology:

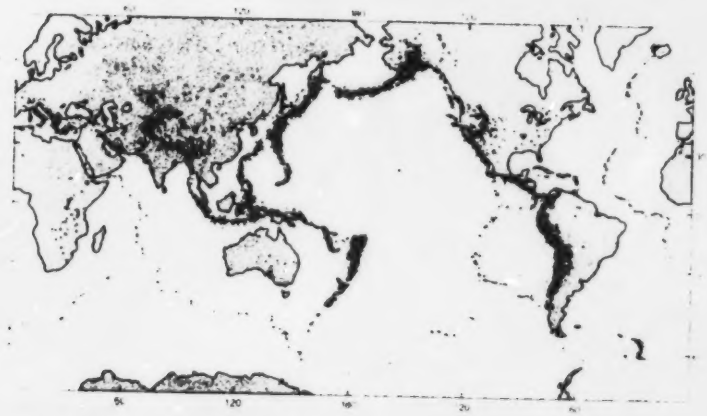
- The increasing accuracy achieved by nuclear missiles, which has reached a point where much smaller yields are thought capable of ensuring destruction of specific targets;
- The increasing attractiveness of very small nuclear weapons (equivalent to a few tons of chemical explosive) to those who would like to use nuclear weapons in a purely tactical battlefield situation, with minimal risk to civilians in the area and minimal environmental involvement; and
- The continuing search for smaller, more effective and more economic nuclear trigger mechanisms.

Although the military significance of these very small nuclear tests is a matter of continuing debate, most experts seem to agree that it would be relatively easy for any nation to test smaller weapons without fear of detection. It would be even easier to do so in those countries where information flow and movement are strictly controlled and where there are large, sparsely inhabited areas.

One Solution: Unmanned Stations for "Close-in" Data Gathering

The discussion and experiments that have been conducted each year since 1976 by the Group of Scientific Experts have always been based on the use of data generally available through the international seismic network. Discussions between the UK, the USA and the USSR during the period 1976–1980 indicated a willingness on the part of those countries to permit the placement of some unmanned devices, sometimes known as "black boxes", within their territories. Once the US and the USSR agreed in principle to the establishment of unmanned stations within each other's borders, American scientists started designing a prototype unmanned station that would be able to continuously transmit data back to the USA by satellite.

Figure 15 Earthquake occurrence worldwide (above magnitude 4.5) for a seven-year period.



The use of such unmanned stations changes the whole nature of the monitoring problem. It also brings into focus Canada's potential role in developing technologies appropriate to this new situation. The key question has now become: How well can events be monitored if stations can be located close to the source of the explosion?

The answer is not a simple one. As Dr. Basham points out, a seismic wave that has travelled a great distance through the Earth's mantle, even though it has lost part of its strength in the process, has a relatively simple seismic signature. By contrast, a shock that has travelled only 500–1000 kilometres may be very complex in wave form, because it will have encountered a myriad of local complexities in the Earth's crust that generate weak but locally recordable signals.

Canada is important so far as on-going research into unmanned seismic stations is concerned. This is because most of Canada sits on a huge ancient rock mass, known as the Precambrian Shield, which is geologically similar to the great continental rock masses that underlie much of Europe and Asia. Canada, thus, in a geophysical sense, resembles the USSR and is therefore a testing ground where a great deal can be learned about close-in seismological techniques that might be applicable to a remotely controlled network within the USSR. Canadian seismographs are also relatively close to, and on the same continental mass as, the Nevada Test Site, the region selected for most USA tests (see Figure 3).

Meanwhile, the USA, in order to gain experience in the operation and operational capabilities of its new remote sensing stations, has installed a North American network of five units, known as the Regional Seismic Test Network. Two of these, by mutual arrangement, are in Canada. One is at Red Lake, Ontario, and the second is near Yellowknife, close to the Canadian array. It will thus be possible to compare the performances of the two, quite different, Yellowknife stations.

Figure 16 Prototype of unmanned United States surface seismograph station in the Adirondack Mountains, containing transmitting and receiving equipment and an antenna for communication via satellite with the RSTN system (see Figure 17) (courtesy of Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico).

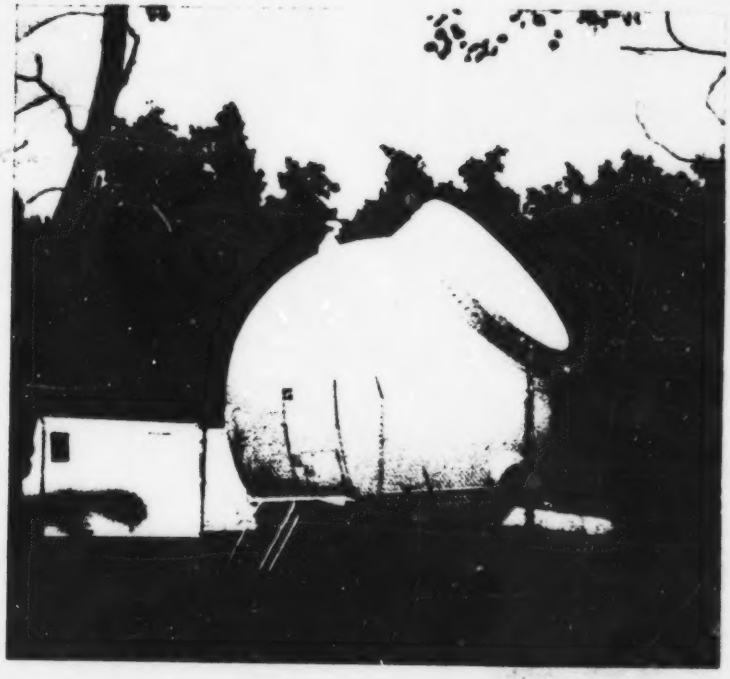
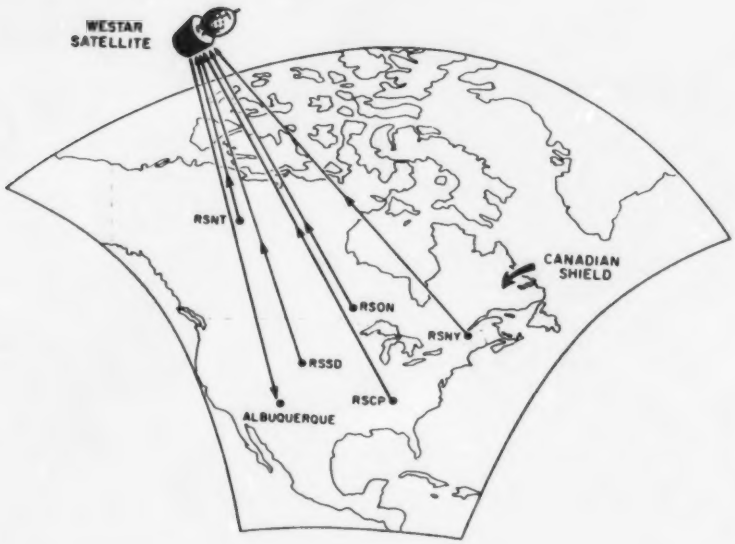


Figure 17 Regional Seismic Test Network (RSTN). Stations on the Canadian Shield at Yellowknife (RSNT) and Red Lake, Ontario (RSON) are operated in a co-operative project between the Canadian Department of Energy, Mines and Resources and the United States Department of Energy. Seismic data are transmitted by WESTAR satellite to Albuquerque, New Mexico.



The Road Ahead

Chapter Seven

The Road Ahead

This type of close-in data may be a key to increasing our ability to identify smaller events. At present, seismologists do not know very much about how higher frequency energy waves propagate through the Earth's crust. One of the matters they will therefore be looking into is the possibility that P-type body waves of much higher frequency than have been used before, may be used to identify low energy nuclear events, even though these waves tend to weaken rapidly over distance.

Dr. North stresses that no nuclear detonations or deliberate detonations of conventional explosives will be needed in the course of this Canadian research. There are many little earthquakes, mine blasts and rock bursts from various sources that can be used.

One fact that is not in dispute is that the task of verification, already complex enough, will be even greater if more close-in data must also be analysed.

The Bottom Line

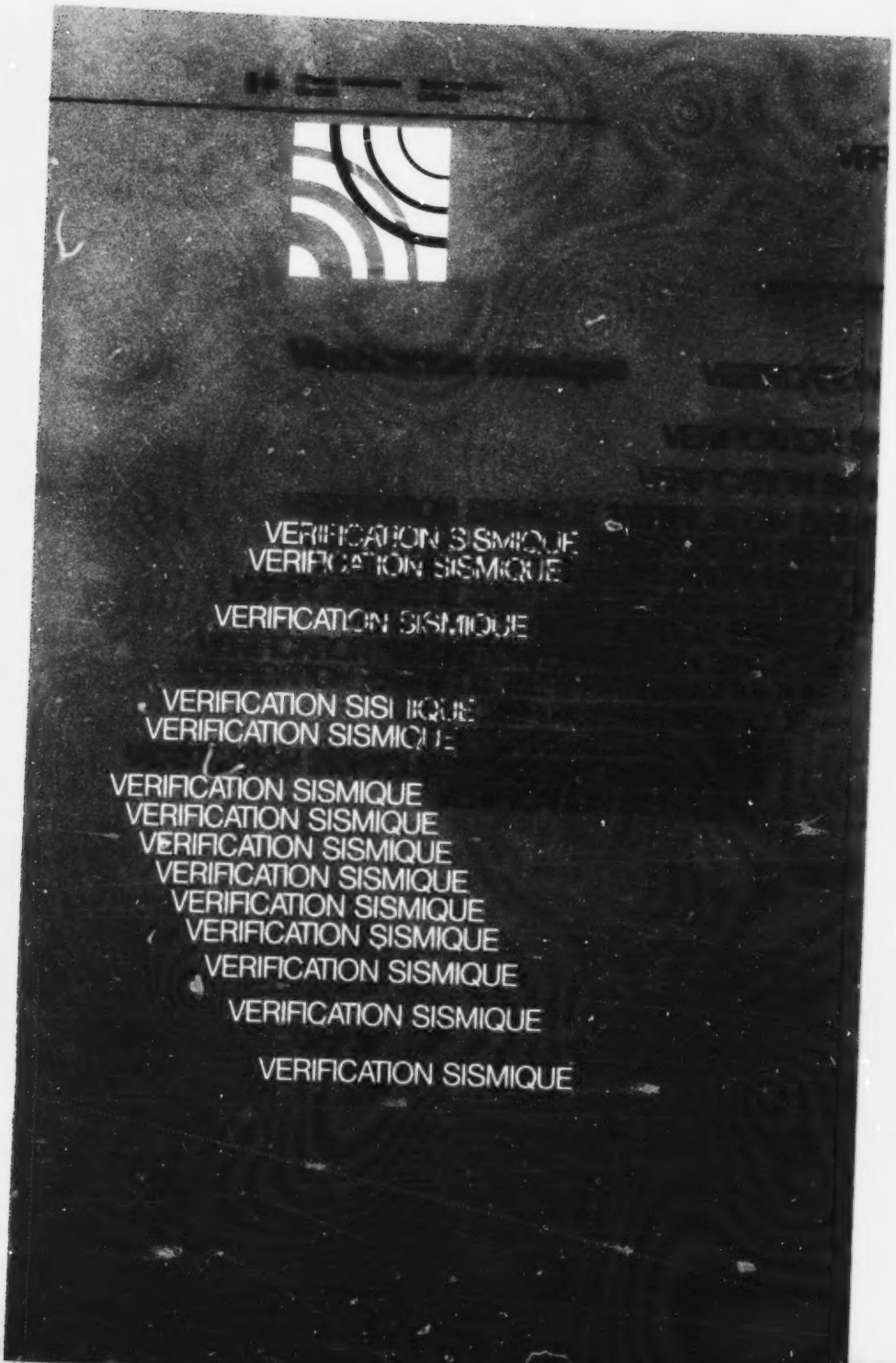
What is the bottom line? Most scientists who have studied these matters agree that, from a technical point of view, any treaty to ban nuclear tests must be based on a genuine desire by all parties to make it work. It would be extremely easy for any nation in almost any part of the world to test a sub-kiloton nuclear device without fear of detection, even if international sensors were to be deployed within its own territory. Whether a factor of this sort stands in the way of successfully negotiating a ban on underground nuclear testing is a matter that politicians and diplomats, rather than scientists, will be in a better position to decide.

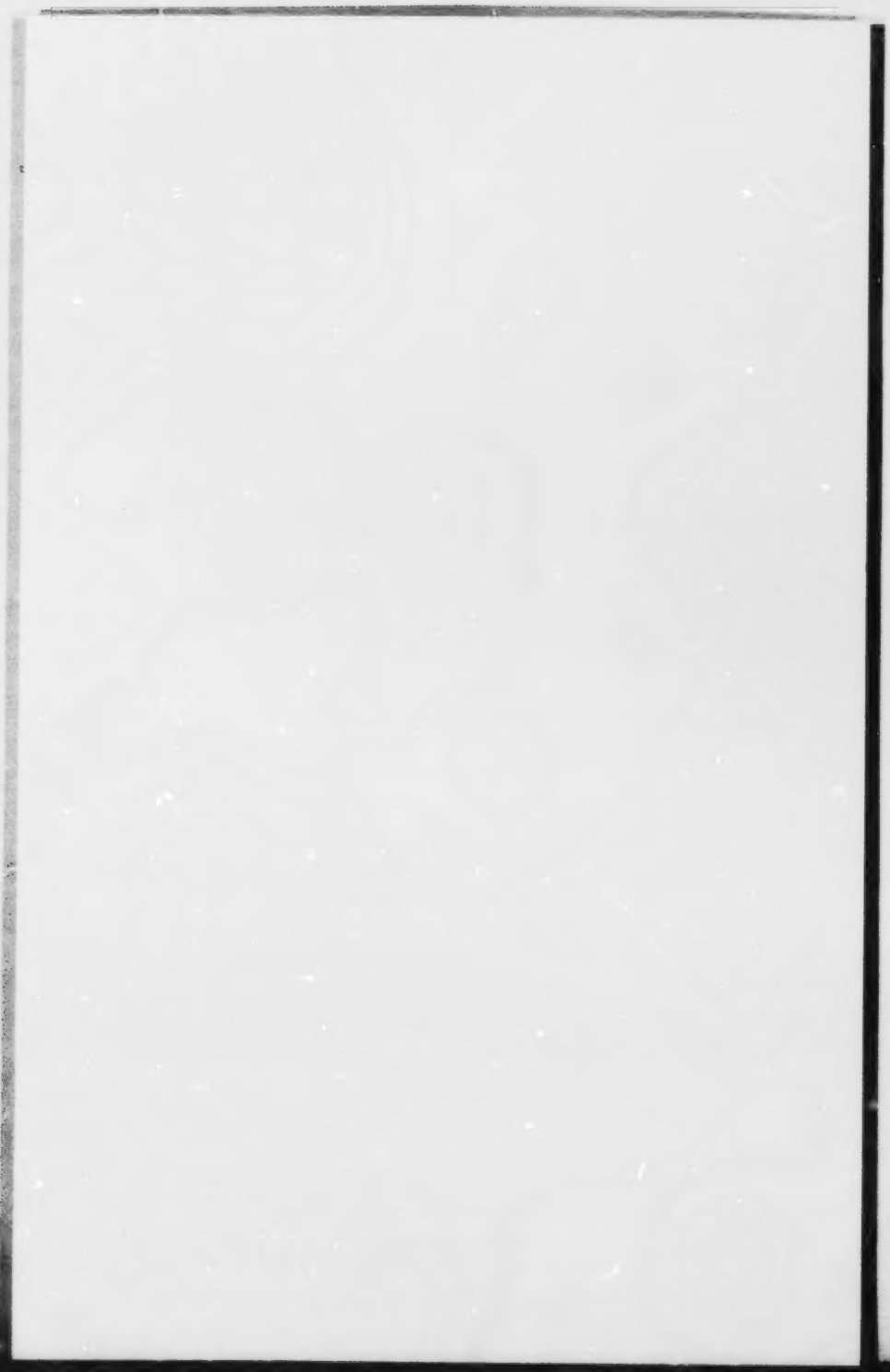
Figure 18 Highlights of international negotiations and initiatives aimed at banning and regulating the use of nuclear weapons.

1946	* USA Baruch Plan for ensuring that atomic weapons are used only for peaceful purposes.
1955	*USSR plan for general and complete disarmament and a ban on all testing of nuclear weapons.
1958 (summer)	*First meeting of seismic experts in Geneva makes recommendations for a global seismographic network and an on-site inspection system.
1958 (autumn)	*Trilateral negotiations (USA, UK, USSR) concerning a test ban treaty leads to an agreement on a moratorium on nuclear testing.
1959	*France, USA, UK and USSR sign a treaty (now subscribed to by 32 countries) banning nuclear tests in Antarctica.
1961	*Nuclear testing moratorium ends with the detonation of the largest-ever nuclear explosive (58 megatons) by USSR.

1963	*India, UK, USA and USSR sign the Partial Test Ban Treaty (now subscribed to by 111 countries) prohibiting nuclear testing in the oceans, the atmosphere and outer space.
1967	*France, India, UK, USA, and USSR sign the Outer Space Treaty (now subscribed to by 92 countries) banning the stationing of nuclear weapons or other weapons of mass destruction in space.
1967	*Twenty-nine Latin American countries sign the Treaty of Tlatelolco prohibiting nuclear weapons in Latin America.
1968	*UK, USA, and USSR sign the Nuclear Non-Proliferation Treaty (now subscribed to by over 127 countries) to prevent an increase in the number of nuclear weapons and to discourage their distribution to other countries.

1971	*UK, USA, and USSR sign the Sea-bed Treaty (now subscribed to by 81 countries) prohibiting the placement of nuclear weapons on the sea-bed.
1974	*USA and USSR sign the Threshold Test Ban Treaty (not ratified) banning underground nuclear testing with yields of more than 150 kilotons.
1976	*US and USSR sign a treaty on Peaceful Nuclear Explosions (not ratified) in order to establish appropriate rules governing underground explosions for peaceful purposes.


VERIFICATION SISMIQUE
VERIFICATION SISMIQUE
VERIFICATION SISMIQUE
VERIFICATION SISMIQUE
VERIFICATION SISMIQUE
VERIFICATION SISMIQUE
VERIFICATION SISMIQUE
VERIFICATION SISMIQUE
VERIFICATION SISMIQUE
VERIFICATION SISMIQUE



Vérification sismique

L'illustration en page couverture symbolise le dialogue permanent sur le contrôle des armements et le désarmement qu'entretiennent les Canadiens entre eux et celui qu'ils établissent avec la communauté internationale.

An English translation of this study is available. To obtain a copy, please contact:

Arms Control and
Disarmament Division
Department of External
Affairs
Tower A, 6th Floor
125 Sussex Drive
Ottawa, Ontario
Canada
K1A 0G2

©Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1986

N° de cat. E2-115/1986F

ISBN 0-662-93602-7

ISSN 0830-9248

Table des matières

Chapitre premier	Introduction	9
Chapitre deux	Le cadre physique : «La Terre, cette table d'harmonie»	15
	Ondes de volume	16
	Ondes superficielles	20
	«Des signatures différentes»	20
	Détection et identification	21
	Explosions nucléaires à des fins pacifiques	23
Chapitre trois	Historique de la participation canadienne à la vérification sismique	26
	Scientifiques et diplomates	28
Chapitre quatre	Efforts internationaux	33
Chapitre cinq	Échange de données sismiques	35
Chapitre six	Obstacles restants	39
	Dissimulation	40
	Découplage en cavité	40
	Le problème de la discrimination	42
	10 000 chocs par année	42
	Le côté pratique	44
	La tendance aux armes nucléaires plus petites	46
	Une solution: les stations automatiques	46
Chapitre sept	Le chemin qui reste à faire	53
	Le facteur décisif	54

Figures

1 Définition du terme vérification 11
2 Le nombre d'explosions nucléaires de 1945 à 1983 13
3 Carte des polygones d'essais nucléaires 14
4 Coupe transversale de la Terre montrant les chemins d'ondes sismiques 17
5 Le sismographe 18
6 Représentation schématique de l'installation d'un sismographe 19
7 Sismogrammes d'ondes de volume et d'ondes superficielles, de périodes courte et longue 22
8 Le nombre d'explosions nucléaires annoncées à des fins pacifiques 25
9 Observatoire fédéral à Ottawa 29
10 Ensemble sismologique de Yellowknife (T. N.-O.) 31
11 Système mondial de télécommunications et participation canadienne à l'Échange international de données sismiques (EIDS) 37
12 Cavité créée par une explosion expérimentale (projet GNOME de l'USAEC) 41
13 Installations de surface au niveau du sol 43
14 La magnitude sismique en fonction de l'énergie libérée 45
15 La répartition des tremblements de terre à travers le monde 47
16 Prototype de station sismologique étatsunienne automatique (boîte noire) 50
17 Regional Seismic Test Network (RSTN) 51
18 Principales étapes des négociations et des initiatives internationales visant à interdire et à réglementer l'utilisation des armes nucléaires 55

Introduction

Introduction

Chapitre premier

Peu importe la solidité qu'elle semble parfois avoir, la planète Terre n'est en réalité qu'une gigantesque table d'harmonie. Ainsi, en appliquant des «oreilles» appropriées sur le sol, il est possible de détecter les vibrations causées par des événements importants qui ont pu se produire à 10 000 kilomètres de distance.

Les bruits les plus fréquemment entendus sont d'origine naturelle — les résultats des séismes, le battement des vagues sur des rives lointaines et le bruit causé par les phénomènes météorologiques — mais les humains fournissent aussi leur propre contribution en effectuant des activités quotidiennes comme l'exploitation minière, la construction et l'utilisation des trains et des véhicules motorisés.

Toutefois, le plus retentissant de tous les bruits d'origine humaine reste encore celui qui provient des explosions nucléaires souterraines, lesquelles peuvent produire dans l'écorce terrestre des chocs pouvant être comparés à ceux de séismes assez violents.

Les appareils employés pour déceler de tels événements sont appelés sismographes (ou sismomètres). Ce sont des dispositifs sensibles qui enregistrent à la fois les mouvements verticaux et horizontaux de la surface terrestre qui pourraient échapper à la capacité sensorielle des êtres humains. Le sismographe constitue probablement le meilleur moyen de vérifier si les traités interdisant tout essai souterrain d'armes nucléaires sont respectés.

Lorsqu'un nombre suffisamment grand de sismographes bien situés détectent le même phénomène, il est souvent possible de comparer leurs résultats et de déterminer avec un degré relatif de certitude la nature du phénomène à l'origine des ondes de chocs, leur lieu d'origine, leur profondeur sous la surface de la terre et la quantité approximative d'énergie produite.

Figure 1 Définition du terme vérification

«La vérification est l'examen d'une chose de manière à pouvoir établir si elle est conforme à ce qu'elle doit être.» (Le Petit Robert)

Au cours de la décennie 80, aucun autre problème n'aura pris autant de place dans les négociations internationales sur le contrôle des armes et le désarmement que la **vérification.** À une époque où la méfiance et l'incertitude sont particulièrement accrues, il ne faudrait pas croire que les pays signeront des traités affectant leur sécurité nationale sans chercher à s'assurer par quelque moyen que les autres signataires respecteront réellement les termes de l'entente. Autrement dit, la **vérification** est le moyen par lequel une telle assurance sera acquise. Qu'il s'agisse d'employer des mécanismes de consultation, de faire appel à des satellites de reconnaissance photographique ou de procéder à des inspections sur place, la capacité de s'entendre au sujet d'un système effectif de vérification peut faire toute la différence en ce qui concerne le succès ou l'échec des négociations d'une entente sur le contrôle des armes.

Le Canada possède une longue tradition de recherche en géophysique et dans la veille sismique. Les experts canadiens qui ont consacré leur carrière à étudier de telles questions estiment que le Canada doit jouer un rôle particulier dans l'élaboration de systèmes de vérification fiables qui devraient constituer un prérequis essentiel à la conclusion de tout traité sur l'interdiction des essais. La dimension du Canada, sa position géographique (fig. 3), ainsi que sa ressemblance géologique à la grande masse rocheuse continentale sur laquelle repose la plus grande partie du continent eurasiatique, de même que notre propre expertise technique, rendent cet objectif possible.

De telles techniques pourront-elles être perfectionnées au point d'inspirer un degré de confiance raisonnable permettant de paver la voie à une cessation des essais nucléaires?

Les experts canadiens en sismologie qui ont participé aux négociations de Genève sur cette question pendant plusieurs décennies rappellent que le problème est des plus complexes puisqu'il met encore en cause de nombreuses inconnues sur le plan strictement technique.

En outre, ils ajoutent que le problème ne pourra être résolu que dans une atmosphère de bonne foi internationale qui suppose une volonté de la part de toutes les nations de rendre accessibles les données sismiques nationales en plus grande quantité que par le passé. À cet égard, il pourrait aussi se révéler nécessaire d'obtenir des concessions supplémentaires, comme celles qui permettraient l'établissement d'un nombre suffisant de stations d'écoute internationales à l'intérieur des frontières des pays visés.

Dans le cadre des engagements continus du gouvernement visant à tenir les Canadiens informés des diverses questions de contrôle des armes et de désarmement, la présente brochure passe en revue l'état actuel des capacités techniques permettant de surveiller une interdiction des essais souterrains, d'explorer le potentiel d'amélioration de ces capacités et de décrire les contributions canadiennes à cet effort de contrôle des armes.

Figure 2 Le nombre d'explosions nucléaires de 1945 à 1983

D'après l'Institut suédois de recherche sur la défense, un total de 1 469 explosions nucléaires ont été provoquées sur notre Terre depuis 1945. De ce nombre, 461 ont été effectuées dans l'atmosphère et 1 008 sous terre. Le tableau suivant indique le nombre d'explosions nucléaires par pays :

	Atmosphère	Sous terre	Total
France	45	75	120
Inde	—	1	1
Chine	22	5	27
Union soviétique	161	368	529
Royaume-Uni	21	15	36
États-Unis	212	544	756
	461	1 008	1 469

Le tableau indique que ce sont les États-Unis qui ont procédé au plus grand nombre d'essais nucléaires et qu'ensemble, les deux superpuissances représentent 87 p. 100 du total. Au cours des dernières années, c'est l'URSS qui a mené le plus d'essais nucléaires, même si le nombre total d'essais a été relativement constant à raison de 51 explosions par année en moyenne, soit à peu près un essai par semaine.

Des événements sismiques indiquent que la plupart, sinon toutes les explosions nucléaires d'aujourd'hui, sont effectuées sous terre. La Chine qui n'a pas adhéré au Traité sur l'interdiction partielle des essais s'est livrée à quelques essais dans l'atmosphère, le dernier ayant été mené en octobre 1980. La France non plus n'a pas signé le traité, mais elle a officiellement déclaré qu'elle ne procéderait à aucun essai d'arme nucléaire dans l'atmosphère. Elle n'a procédé à aucun essai de ce type depuis 1974.

Figure 3 Carte des polygones d'essais nucléaires. L'ensemble de Yellowknife est situé dans un rayon de 10 000 km de tous les principaux polygones d'essais d'explosions nucléaires souterraines.

Le cadre physique
«La Terre, cette table d'harmonie»

Chapitre deux

Le cadre physique : «La Terre, cette table d'harmonie»

Pour apprécier l'ampleur du défi que doivent relever les scientifiques dans ce domaine vital du contrôle des armes, il convient de se représenter la Terre que nous habitons sous forme de sphère possédant un rayon approximatif de 6 500 kilomètres et une circonférence d'environ 40 000 kilomètres. Elle comprend trois parties principales : la croûte, le manteau et le noyau (Voir fig. 4).

La discontinuité entre le manteau de la Terre et son noyau liquide constitue un obstacle réel à la transmission de la plupart des ondes sismiques, soit en les réfléchissant vers le haut ou en les faisant obliquer vers le noyau de la Terre. Ainsi, le noyau jette une «ombre» qui empêche les stations à l'écoute de détecter clairement certaines ondes sismiques à des distances dépassant environ 10 000 kilomètres.

Il existe une autre limite qui découle du fait que les différentes formations géologiques transmettent les ondes sismiques avec plus ou moins d'efficacité. Ainsi, les roches granitiques dures et les gisements de sel transmettent comparativement bien les chocs à fréquence élevée, tandis que le tuf (une roche composée de fragments volcaniques) transmet mal les ondes sismiques. Les sédiments, souvent d'origine sablonneuse ou vaseuse, sont encore moins efficaces comme transmetteurs d'ondes sismiques. Par conséquent, l'amplitude enregistrée des ondes sismiques produites par un événement donné, lorsqu'elle est mesurée à une certaine distance, peut varier suivant un facteur de 10, selon le type de terrain sur lequel se produit l'événement.

Lorsqu'un événement sismique se produit à l'intérieur de la Terre par suite d'un tremblement de terre ou d'une explosion souterraine, il engendre différents types d'ondes sismiques, les deux principales catégories étant les ondes de volume et les ondes superficielles.

Ondes de volume

Les ondes de volume voyagent à travers la masse ou manteau de la Terre. L'onde de volume qui se déplace le plus rapidement est l'onde longitudinale P (primaire) qui ressemble plutôt à une onde sonore se déplaçant à travers la masse rocheuse de la Terre. Le second type d'ondes de volume est celui des ondes S ou ondes de cisaillement auxquelles on attribue le nom d'ondes transversales; elles se déplacent à environ 60 p. 100 de la vitesse des ondes P.

Toutes les ondes de volume voyagent à une vitesse propor-

Figure 4. Coupe transversale de la Terre montrant les chemins empruntés par les ondes sismiques. La zone d'ombre est créée par les ondes déviées par le noyau de la Terre. La période de temps qui s'écoule entre l'arrivée des ondes P directes et les ondes P réfléchies par la surface (pP) donne une indication de la profondeur de l'événement sismique.

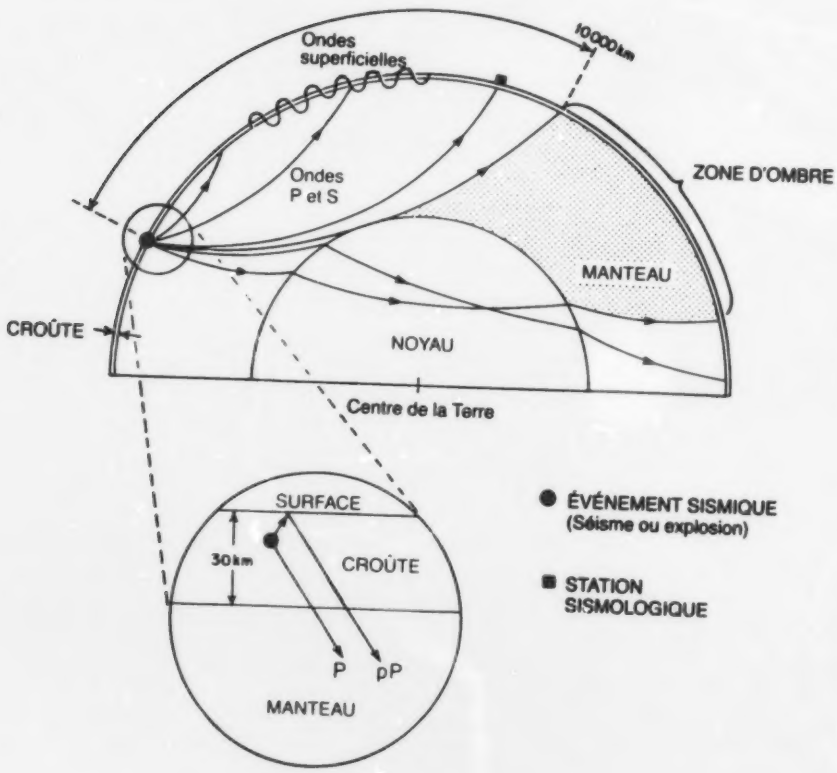


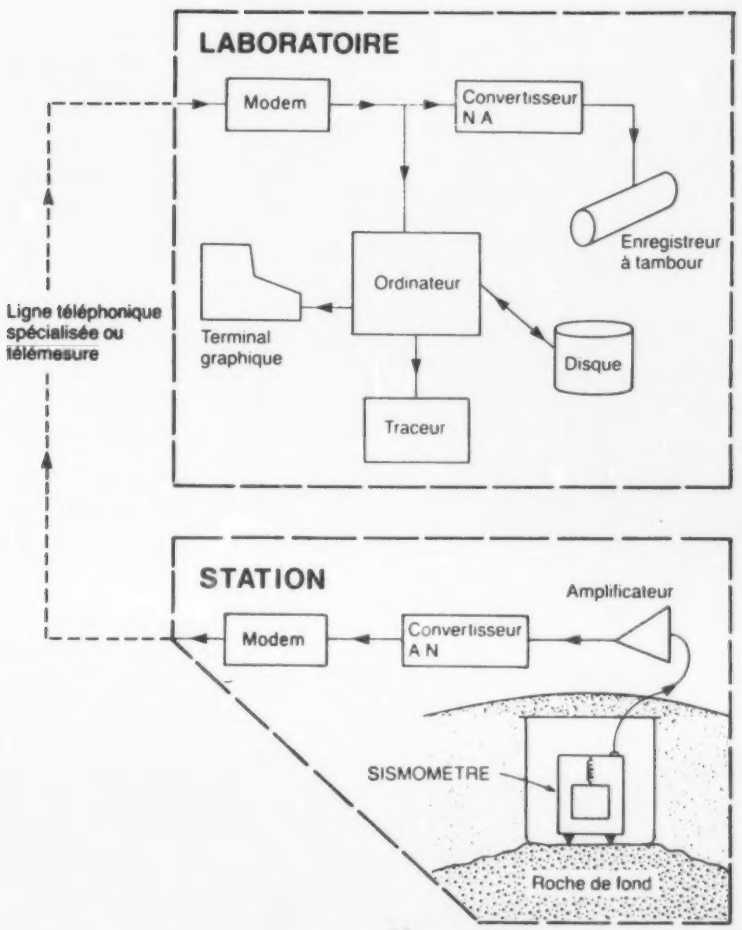
Figure 5 Le sismographe. L'appareil employé pour détecter des ondes sismiques est appelé sismomètre (illustration à la page19) et il prend habituellement la forme d'une boîte métallique, d'environ 20 centimètres de diamètre et de 30 centimètres de hauteur, munie d'une bobine de fil métallique. À l'intérieur de la bobine, se trouve en permanence un aimant suspendu à partir du sommet de la boîte au moyen d'un ressort et cet aimant peut se déplacer librement de haut en bas.

La boîte métallique, avec sa bobine, est montée directement sur le roc solide et toute vibration de la Terre lui imprimera un mouvement de haut en bas, mais l'aimant, étant quelque peu massif, aura tendance à rester en place. Ce mouvement relatif produira un faible courant électrique dans la bobine et ce courant peut être mesuré et enregistré sous forme d'ondes sur un rouleau de papier en mouvement ou sur un ruban magnétique.

Le courant induit dans la bobine sera proportionnel au mouvement de l'aimant à l'intérieur de la bobine. La période naturelle de vibration du ressort est celle d'une onde P (primaire) moyenne, soit environ une seconde. Toutefois, en réglant l'amplificateur électrique qui enregistre ces mouvements, il est possible d'enregistrer des ondes sismiques dont les fréquences peuvent atteindre 100 cycles par seconde (hertz).

Bien que le sismomètre soit un appareil relativement petit et compact, une installation sismographique peut comprendre un nombre donné de sismomètres, de même qu'un laboratoire d'analyse des données, un ordinateur et du matériel électronique assorti pour numériser les données à des fins d'analyses plus poussées.

Figure 6 Représentation schématique de l'installation d'un sismographe numérique moderne. (N-numérique, A-analogique)



tionnelle à la densité du milieu traversé. Elles ont tendance à adopter le chemin le plus rapide et par conséquent à emprunter des itinéraires profondément enfouis dans la Terre, où les matériaux sont plus denses. Les ondes P ont une période d'environ une seconde. Ce sont ces ondes de volume à fréquence plus élevée qui sont ressenties par les êtres humains et qui causent des dégâts dans une zone soumise à un tremblement de terre violent. Les ondes de volume S, qui peuvent être enregistrées au moyen de sismographes dans le cas des tremblements de terre, sont habituellement absentes ou d'importance négligeable dans le cas des explosions.

Ondes superficielles
Les ondes superficielles, (qui portent aussi le nom d'ondes de Rayleigh, d'après le premier scientifique à en faire la description) se comportent comme des ronds à la surface de l'eau. Elles se déplacent beaucoup plus lentement que les ondes de volume et elles possèdent une fréquence de vibration beaucoup plus basse (les ondes superficielles ont une période d'environ 20 secondes), mais elles jouent un rôle important dans la sismologie de détection, particulièrement lorsque vient le temps d'identifier la source d'un événement.

«Des signatures différentes»
Lorsqu'un choc terrestre de magnitude suffisante se produit quelque part dans la portée d'une station d'écoute donnée, le premier signal qui est enregistré est celui de l'onde de volume P. Il peut être suivi par d'autres ondes P qui empruntent des chemins différents et plus lents, puis, particulièrement dans le cas d'un séisme souterrain de grande profondeur, parce qu'il porte le nom d'ondes pP qui se déplacent d'abord vers le haut avant d'être réfléchies vers le bas par la surface de la Terre.

Peut-être 20 ou 30 minutes plus tard, si le choc est lointain, les ondes superficielles de basse fréquence devraient selon toute probabilité être enregistrées. La différence dans le temps d'arrivée entre les ondes P et les ondes superficielles donne habituellement une estimation approximative de la distance entre le sismomètre et la source de l'événement.

Tandis qu'un tremblement de terre fournit habituellement un assortiment compliqué d'ondes sismiques en raison de la superficie du mouvement géologique en cause, les explosions fournissent des signatures relativement simples. Par conséquent, les ondes créées par des explosions ont tendance à apparaître très différentes des

tremblements de terre aux yeux expérimentés du sismologue. Ainsi, ces ondes d'explosions possèdent habituellement une fréquence supérieure et une durée plus courte. En outre, l'onde de volume P initiale provenant d'une explosion a tendance à être plus grande que celles qui sont causées par des tremblements de terre.

Il est ainsi relativement facile pour un expert de distinguer entre des tremblements de terre et des explosions de grande magnitude. Toutefois, certains problèmes surviennent lorsque vient le temps d'établir des distinctions à de faibles magnitudes. M. Robert North, chercheur principal en sismologie à la Direction de la physique du Globe (Énergie, Mines et Ressources Canada), explique que deux difficultés sont rencontrées dans l'interprétation des enregistrements d'événements plus petits. D'abord, les signaux d'ondes sismiques ont tendance à se laisser engloutir dans le bruit de fond comme ceux qui sont produits par les mouvements de l'océan ou le vent et, en deuxième lieu, les petites explosions et les petits tremblements de terre ont tendance à se ressembler sur les sismogrammes.

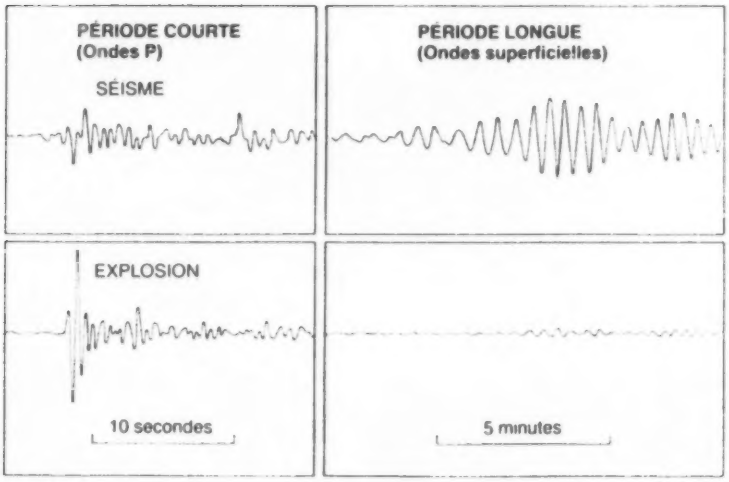
Détection et identification

Tout programme de vérification prévoit deux processus distincts : i) la détection ou la reconnaissance qu'un événement sismique s'est produit et à quel endroit, et ii) la détermination de la nature de l'événement.

Le seuil qui permet aux experts d'avoir confiance en leurs capacités de détecter et d'identifier une explosion nucléaire parmi d'autres bruits microsismiques constitue l'élément-clé en matière de vérification sismique lorsque vient le temps d'élaborer un hypothétique traité, d'après le Chef de la recherche en vérification sismique à la Direction de la physique du Globe (Énergie, Mines et Ressources), le docteur Peter Basham.

Habituellement, un certain nombre de stations enregistrent un événement donné. Plus le nombre de stations est grand, meilleures sont les informations obtenues et, si ces stations sont géographiquement bien situées, il doit alors être possible de déterminer l'endroit approximatif où l'événement s'est produit à 10 ou 30 kilomètres près. Une fois le lieu de l'événement déterminé, il peut être nécessaire de confier à un sismologue une analyse hautement sophistiquée des données afin de déterminer la nature de l'événement, particulièrement si les signaux sont détectés

Figure 7 Sismogrammes enregistrés à la station de Glen Almond (Québec) pour un séisme et une explosion. Les deux événements ont eu lieu en Union soviétique en octobre 1984 à une distance d'environ 8 000 km. Comme l'indiquent les sismogrammes, la différence la plus importante entre les signaux provenant des deux types d'événements est le fait que l'explosion a produit des ondes superficielles beaucoup plus petites.



juste au-dessus du niveau de bruit microsismique.

Il peut aussi être important de déterminer l'énergie libérée dans une explosion, particulièrement si un traité, au lieu d'interdire complètement les essais, fixe un seuil-limite pour l'ampleur des essais. Lorsqu'un événement a été identifié comme étant d'origine nucléaire et que vient le temps de déterminer la quantité d'énergie libérée, des ajustements sont apportés aux lectures sismiques (étalonnage) sur la base des données sismiques antérieurement collectées pour la même région. Idéalement, de telles données devraient être fournies par le pays d'origine; toutefois, il existe un problème du fait que certains pays, notamment les États-Unis, ont fourni une grande quantité de données tandis que d'autres très peu, sinon pas du tout.

L'URSS, par exemple possède son propre réseau sismique national qui sert à détecter les tremblements de terre survenus à l'intérieur de son territoire et dans le cadre du réseau mondial de détection des tremblements de terre. Même si l'Occident a eu accès à certaines de ces données, l'URSS n'a jamais divulgué de données sismiques sur une explosion nucléaire produite à leur polygone d'essais.

Explosions nucléaires pacifiques

En 1976, les États-Unis et l'URSS ont signé le Traité sur les explosions nucléaires pacifiques qui impose aux deux nations de partager les données et l'accès aux sites d'explosion destinés à des fins pacifiques. Par suite de cette entente, les deux superpuissances ont permis la publication d'une bonne quantité de données concernant l'objet de telles explosions. Par exemple, bien que les États-Unis aient cessé d'avoir recours à des explosions nucléaires pacifiques en 1973, on s'en était servi jusqu'alors dans le but de créer des réservoirs potentiels pour les produits pétroliers ou pour explorer les possibilités d'extraction des huiles lourdes. Dans le cas de l'URSS, les objectifs poursuivis étaient notamment les suivants :

- Excavation de canaux de surface;
- Détournement des eaux;
- Création de cavités pour l'entreposage des produits pétroliers et, en une occasion,
- Extinction d'un incendie de puits de pétrole.

En vertu de l'entente, les deux pays ont aussi convenu de partager leurs données relatives à l'énergie dégagée par ces explo-

sions, de même que les données sur le type de roches dans lesquelles l'explosion a été effectuée. De telles informations sont absolument nécessaires pour l'étalonnage et par la suite, le processus général de vérification. Jusqu'à aujourd'hui, ces données ont été rendues facilement accessibles par les États-Unis et il est à espérer que des données analogues seront bientôt rendues accessibles par l'URSS.

Figure 8 Explosions nucléaires pacifiques annoncées (tenues en dehors des polygones d'essais ordinaires).

Année	URSS	États-Unis	Inde
1961		1	
1962		2	
1963		4	
1964		8	
1965		3	
1966	1	7	
1967		4	
1968	1	4	
1969	4	2	
1970	3	1	
1971	7	1	
1972	9		
1973	5	3	
1974	3		1
1975	2		
1976	2		
1977	5		
1978	7		
1979	8		
1980	3		
1981	5		
1982	16		
1983	13		
Total	**94**	**40**	**1**

Historique de la participation canadienne à la vérification sismique

Chapitre trois

Historique de la participation canadienne à la vérification sismique

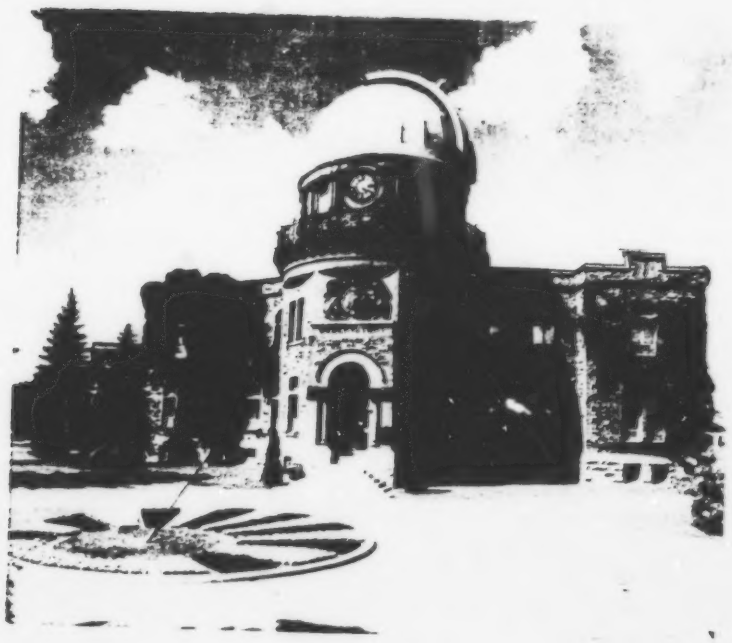
Scientifiques et diplomates
Pour améliorer la capacité canadienne en matière de surveillance des essais souterrains, un programme intergouvernemental a été lancé récemment et dans ce programme, la section de vérification et de recherche en matière de désarmement et de contrôle des armes au ministère des Affaires extérieures a fourni les fonds nécessaires à la Direction de la physique du Globe, du ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources, pour permettre de combler les besoins supplémentaires en personnel et en matériel informatique. Dans le cadre de ce programme, des experts techniques d'Énergie, Mines et Ressources collaborent étroitement avec certains diplomates des Affaires extérieures lorsque vient le temps d'engager des négociations internationales concernant les traités susceptibles de limiter ou d'interdire les essais d'armes nucléaires.

Les responsabilités de la Direction de la physique du Globe comprennent l'exploitation du Réseau canadien de sismologie. Avec les données tirées de ce réseau, la Direction fournit une contribution continue à la surveillance sismique mondiale en partageant les données canadiennes avec les organismes internationaux. Le premier objectif de la Direction est toutefois de surveiller les tremblements de terre canadiens et d'étudier les risques sismiques au Canada.

Des experts canadiens en sismologie participent à des efforts de contrôle des armes depuis qu'il a été constaté que la sismologie pouvait contribuer à la surveillance des explosions souterraines. Ainsi, en 1958-1959, la Direction de la physique du Globe était représentée au sein d'une conférence d'experts qui s'est réunie à Genève afin de discuter de la possibilité d'exercer une surveillance sismique sur un éventuel traité d'interdiction des essais.

Le docteur Peter Basham, dont le nom est maintenant bien connu dans la documentation scientifique qui porte sur les questions de sismologie, se souvient que l'événement d'une importance particulière qui a amené les experts d'un peu partout dans le monde à se réunir a été le premier essai souterrain enregistré d'un engin nucléaire au Nevada en 1957. Ses réverbérations ont été détectées par des sismographes à une bien plus grande distance que prévu.

Figure 9 Bâtiment de l'Observatoire fédéral situé sur l'avenue Carling à Ottawa, qui abrite maintenant la Direction de la physique du Globe (ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources).



Bien que des négociations se soient déroulées entre les États-Unis et l'Union soviétique à la fin des années 50, la réunion d'experts tenue à Genève en 1958 a constitué la première rencontre d'importance entre l'Est et l'Ouest pour discuter de vérification sismique sur le plan technique. Les participants à cette réunion en sont venus à la conclusion qu'un traité sur l'interdiction des essais souterrains pouvait être surveillé par les efforts combinés de quelque 150-170 stations sismologiques réparties à travers le monde.

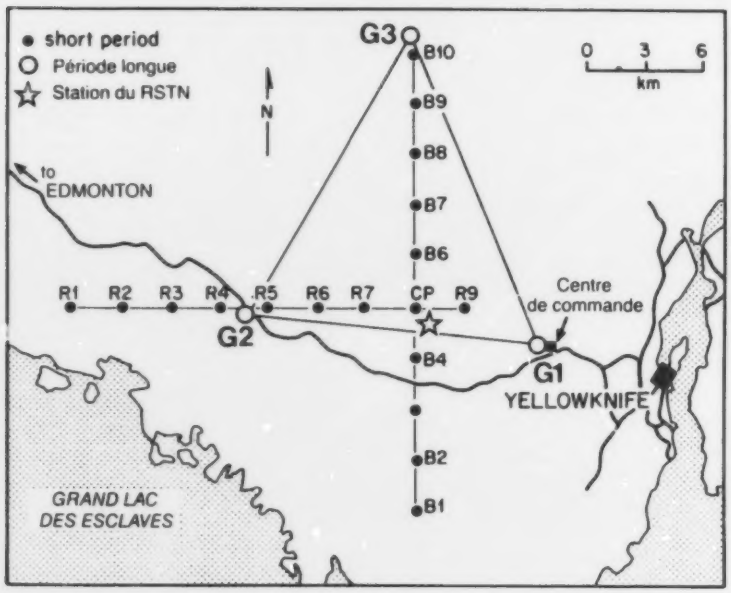
Les stations en service à ce moment ont dès lors été consacrées uniquement à la détection des tremblements de terre et les recherches ont commencé immédiatement afin de déterminer le type de sismographe amélioré qui pourrait servir à surveiller un hypothétique traité sur l'interdiction des essais.

Le Royaume-Uni a été le premier à prendre le départ. La *UK Atomic Energy Authority* a commencé ses expériences par l'essai d'ensembles sismologiques cruciformes, faisant essentiellement appel à la théorie alors en voie d'élaboration concernant les antennes de radio pour détecter les ondes sismiques. Ces ensembles pouvaient être «orientés» électroniquement afin de réduire le bruit microsismique et d'améliorer la qualité de détection. Ils pouvaient aussi donner une direction et une distance approximatives (et, partant, le lieu) d'un événement sismique.

Au début des années 60, les Britanniques ont construit quatre de ces ensembles, qui sont encore tous en service, en Écosse, en Inde, en Australie et dans les Territoires du Nord-Ouest (Canada) près de Yellowknife. L'appareil de Yellowknife comprenait 19 sismomètres et possédait quatre rangées, d'une longueur d'environ 10 kilomètres chacun.

L'ensemble original de Yellowknife était administré par la Commission canadienne de recherche sur la défense jusqu'en 1962, année où les responsabilités ont été transmises au ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources. L'appareil a été amélioré considérablement avec les années et il est maintenant informatisé. Il forme une partie relativement petite mais importante d'un réseau continental de stations sismologiques canadiennes dont le nombre dépasse aujourd'hui la centaine.

Figure 10 Ensemble sismologique de Yellowknife (T. N.-O.). Les sismomètres à période courte, situés à des intervalles de 2,5 km, forment une croix irrégulière; les sismomètres à période longue forment un triangle d'environ 16 km de côté. Les données sismiques provenant des sismomètres sont transmises au centre de commande du *Regional Seismic Test Network (RSTN)* à Albuquerque (Nouveau-Mexique) par télémesure.



La documentation scientifique révèle qu'au cours de ces premières années, le petit groupe d'experts canadiens a apporté une contribution appréciable à la compréhension générale de ce que supposent d'efforts la détection et l'identification sûres des événements sismiques lointains. Au cours des 10 dernières années, les recherches effectuées par ce groupe ont été de plus en plus inspirées par des discussions internationales hautement techniques concernant la vérification d'un traité d'interdiction des essais. Ces discussions sont menées surtout à Genève, avec des scientifiques d'Énergie, Mines et Ressources qui agissent pour le compte du ministère des Affaires extérieures.

Comme indication de l'intérêt porté par le Canada à la réalisation d'un traité effectif d'interdiction des essais, on peut noter son parrainage à l'Assemblée générale des Nations Unies, vers la fin des années 60, d'une résolution-clé demandant à tous les pays de remettre à l'ONU leurs données concernant les possibilités de leurs observatoires sismiques respectifs, de telle sorte qu'une évaluation puisse être effectuée concernant leur capacité de contribuer à un réseau de surveillance de l'interdiction des essais. De grandes quantités de documents ont été acheminées au siège de l'ONU, à New York, où on a procédé à leur analyse avec l'aide de Canadiens. Une étude effectuée par Basham et Whitham, qui sont au service de la Direction de la physique du Globe, dresse un bilan des résultats obtenus et, en conclusion, les auteurs constatent qu'avec le réseau qui existait, la probabilité de détecter un événement sismique d'une magnitude de 4,5 à l'échelle Richter dans l'hémisphère Nord, était de 90 p. 100. Toutefois, la confiance était beaucoup moins grande en ce qui concerne la capacité de déterminer correctement si le même événement était un tremblement de terre ou une explosion. Un événement d'une telle magnitude équivaudrait à la détonation de 3-10 kilotonnes d'explosifs en milieu de roches dures.

Dans l'hémisphère Sud, formé à 85 p. 100 d'océans, la capacité serait beaucoup moins grande en raison de la rareté des bonnes stations sismologiques. Le rapport canadien contenait un certain nombre de recommandations quant à la façon d'améliorer cette capacité de détection tandis que d'autres études ont porté sur les moyens d'améliorer les estimations de l'ampleur des événements lointains.

Efforts internationaux

Chapitre quatre

Efforts internationaux

En 1976, la Conférence du Comité du désarmement, à Genève, a donné son premier mandat au Groupe d'experts scientifiques. On leur a demandé de préciser les éléments techniques d'un éventuel système international d'échange de données sismiques et de fournir des résultats et des analyses factuelles concernant les méthodes d'échange des données.

Les mots-clés ici sont «échange international de données sismiques». Il est également important de bien s'entendre sur ce que le mandat ne renferme pas. Ainsi, le Groupe n'a pas pour but de concevoir ou de mettre au point un système international visant à surveiller le respect d'un hypothétique traité. Son objectif est bien plutôt de faciliter la vérification par un État intéressé, grâce à un échange coopératif de données sismiques pertinentes.

En d'autres termes, ce que le Groupe de Genève a fait depuis 1976, c'est de discuter des moyens techniques et sismologiques permettant de réaliser un tel échange de données parmi les pays participants. Le système, tel qu'il est conçu actuellement, rend les données accessibles à n'importe quel pays participant qui le désire. La vérification demeure une responsabilité nationale.

Les membres du Groupe d'experts scientifiques se rencontrent à Genève pendant deux semaines deux fois par année. Par suite de leurs initiatives, des expériences internationales ont été menées en 1980, 1981 et 1984 afin d'éprouver et d'améliorer un élément-clé de la surveillance mondiale, celui de l'échange rapide de données entre les nations. L'expérience d'Échange international de données sismiques qui a été menée sur une base mondiale au cours des deux mois allant du 15 octobre au 15 décembre 1984 est de loin la plus importante des expériences menées à ce jour.

Échange de donnees
sismiques

Chapitre cinq

Échange de données sismiques

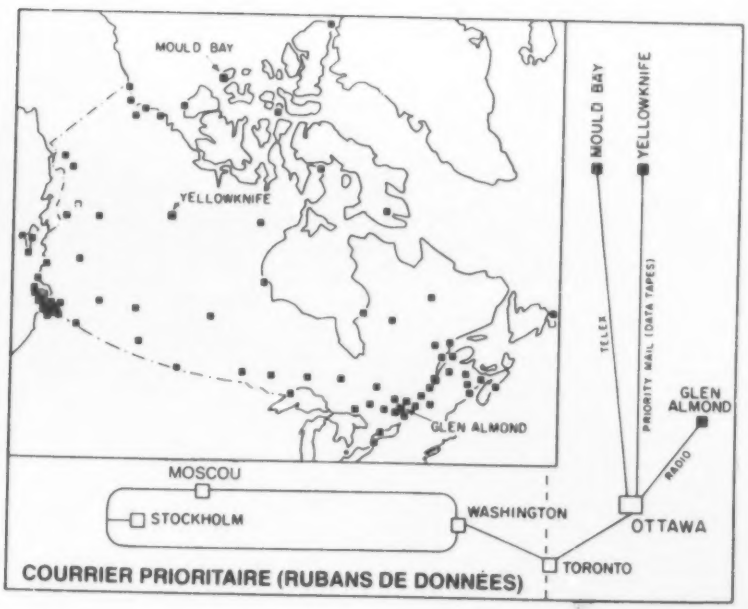
Comme dans le cas des expériences organisées par le Groupe d'experts scientifiques en 1980 et 1981, les résultats de l'expérience d'Échange international de données sismiques de 1984 ont fait ressortir l'importance d'une communication à la fois fiable et rapide. Le réseau de transmission employé a été celui de l'Organisation météorologique mondiale, qui porte le nom de Système mondial de télécommunications. À l'origine, cette liaison de données était simplement destinée à l'échange international de données météorologiques, mais l'Organisation météorologique mondiale permet depuis une dizaine d'années de s'en servir à «d'autres fins environnementales». Dans un tel contexte, six pays ou plus ont pris l'habitude de s'en servir pour l'échange de données sismiques à des fins de surveillance mondiale des tremblements de terre.

Compte tenu de la quantité de données considérées, certaines craintes ont été exprimées à l'effet que le Système mondial de télécommunications en viendrait à ployer sous le poids des données supplémentaires qui sont produites à l'occasion d'une expérience sismique mondiale donnée. Toutefois ceci ne s'est pas produit, en partie parce qu'on a su restreindre le trafic sismique aux heures creuses.

Le programme pour l'expérience a été très bien planifié par le Groupe des experts scientifiques et une tentative a été faite pour amener le plus grand nombre possible de pays à y participer. Trois États, les États-Unis, l'URSS et la Suède, ont accepté de laisser leurs installations nationales de calcul sismique servir de centres internationaux de données expérimentales. Une trentaine de pays et plus de 70 stations sismologiques ont participé à l'expérience.

Chacune des stations a essayé de mesurer certains paramètres qu'il était convenu d'enregistrer au moyen de leurs appareils pour tous les événements sismiques. Ces données ont ensuite été transmises sous forme codée en empruntant le Système mondial de télécommunications. Les centres internationaux de données situés à Moscou, Stockholm et Washington ont reçu ces données et ont produit des bulletins d'événements sismiques. Ces bulletins ont été transmis aux États participants dans les cinq jours suivants.

Figure 11 Système mondial de télécommunications et participation canadienne à l'Échange international de données sismiques de 1984. Les stations sismologiques canadiennes sont indiquées en noir; les trois stations de droite ont contribué à l'échange expérimental de données.



Parmi les 100 stations sismologiques et plus que le Canada exploite, trois d'entre elles ont été retenues pour l'expérience. Il s'agit des stations de l'ensemble de Yellowknife, de celles de Glen Almond (Québec) à une cinquantaine de kilomètres au nord-est d'Ottawa et de celles de Mould Bay dans l'Arctique canadien.

L'expérience avait, entre autres, comme objectif important de déterminer la quantité de données mises en circulation dans l'ensemble du réseau et la quantité de données perdues. Le Canada a tenu ses propres statistiques sur l'expérience et il a participé à une évaluation internationale faite par le Groupe d'experts scientifiques à Genève. Il est possible d'apprécier l'ampleur de la contribution générale du Canada si l'on sait que ses trois stations ont fourni entre 10 et 15 p. 100 de l'ensemble des données recueillies à partir de quelque 70 stations.

Même si de grands progrès ont été réalisés au cours des 10 ou 15 dernières années, particulièrement en ce qui concerne l'analyse informatisée et en temps réel des données, les résultats préliminaires de cette vaste opération couronnée de succès montrent qu'il reste encore beaucoup de chemin à faire dans l'application des plus récentes techniques de traitement des données pour manipuler les énormes quantités d'informations qui seraient produites sur une base quotidienne par un système international d'échange de données de ce type.

Obstacles restants

Chapitre six

Obstacles restants

Dissimulation
La capacité de détection d'un réseau sismographique dans une zone donnée dépend fortement de la force des signaux reçus et du niveau de bruit microsismique.

Il ne faut pas oublier non plus que la détection et l'identification des explosions souterraines peuvent souvent être déjouées ou gênées par plusieurs méthodes de dissimulation possibles :

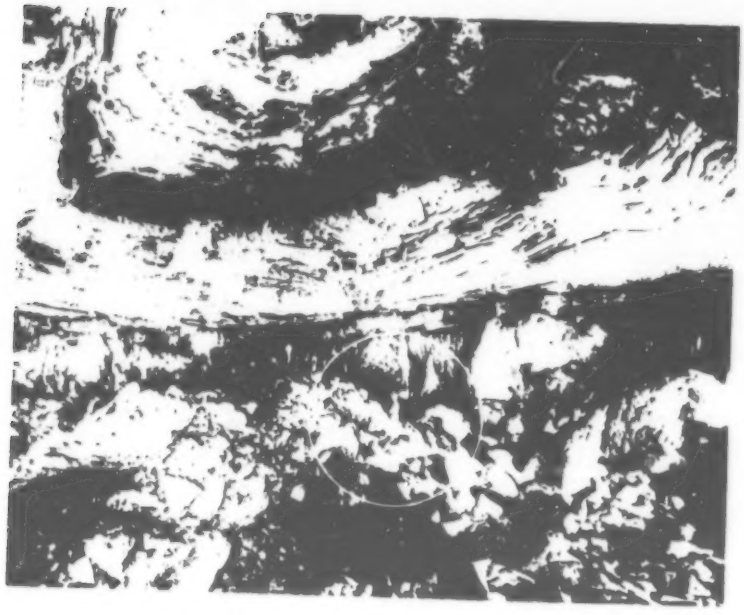
- Signaux sismiques maintenus sous le niveau de «bruit» microsismique;
- Essais pratiqués dans une zone propice aux tremblements de terre ou bruits pseudo-normaux créés en même temps que l'explosion pour masquer celle-ci;
- Polygone choisi de telle manière que le signal traverse une région absorbante de la croûte terrestre, ou
- «Découplage» partiel ou complet de l'explosion à partir de son milieu environnant solide immédiat, en faisant détoner l'engin dans une vaste caverne artificielle.

Même en supposant l'établissement d'un vaste réseau sismographique à l'intérieur de l'URSS, il faut accepter que la détonation d'un engin d'une puissance de 0,1 kilotonne équivaut à seulement 100 tonnes d'explosifs chimiques, et qu'elle passera probablement inaperçue, même sans recours à un subterfuge. Grâce à une certaine manipulation, comme le découplage en cavité (dont il est question ci-dessus), ce chiffre pourrait être multiplié par un facteur situé entre 50 et 100, ce qui donnerait alors l'impression que l'engin soumis à des essais est cent fois plus petit qu'il ne l'est en réalité.

Découplage en cavité
Les États-Unis ont été le premier pays à signaler le phénomène de découplage en cavité. Dans les années 60, ils ont procédé à de grands essais nucléaires et chimiques dans des dômes de sel souterrains, et les résultats obtenus permettent de croire qu'une cavité de 50 mètres de rayon pourrait étouffer complètement le bruit d'une explosion de cinq kilotonnes.

Une telle technique pourrait étouffer complètement le bruit d'une explosion plusieurs fois plus grande si la cavité était créée dans un matériau plus dur, le granit par exemple. Comme une seule cavité souterraine et sphérique d'une si grande dimension serait difficile à creuser sans tôt ou tard risquer qu'elle ne s'effondre en raison de l'endommagement

Figure 12 Cavité créée par une explosion expérimentale (Gnome) de l'*US Atomic Energy Commission (USAEC)*; l'explosion a eu lieu à 1 200 pieds sous terre, le 10 décembre 1961. La cavité mesurait 160-170 pieds de diamètre sur 60-90 pieds de profondeur et elle a été formée par une détonation nucléaire d'une puissance approximative de 3 kilotonnes. (Courtoisie du Lawrence Radiation Laboratory, Livermore, Californie).



causé à la roche environnante, il existe un moyen de contourner cette difficulté et ce moyen, qui a été employé avec succès par le passé, consiste à accroître la dimension effective de la chambre en la reliant à un réseau de galeries.

Certains pays ont suggéré d'exercer une surveillance par satellite comme moyen complémentaire d'assurer le respect d'un traité d'interdiction des essais nucléaires, or, il faut préciser ici que les signes extérieurs et visibles laissés par le découplage en cavité ne révéleraient probablement pas grand-chose à un satellite. La photographie aérienne ci-jointe montre des installations de surface aménagées à l'occasion d'une expérience nucléaire souterraine aux États-Unis, l'image ressemble à s'y méprendre à une exploitation minière classique ou tout simplement à d'autres activités de la grande industrie.

Le problème de la discrimination

Une fois que des ondes sismiques ont été détectées, il faut ensuite déterminer si elles proviennent d'un tremblement de terre, d'une explosion chimique ou d'une explosion nucléaire. Les facteurs déterminants sont notamment le lieu et la profondeur sous la surface du sol, compte tenu du fait que la limite actuelle des possibilités de forage utile se situe à environ 10 ou 15 kilomètres de profondeur.

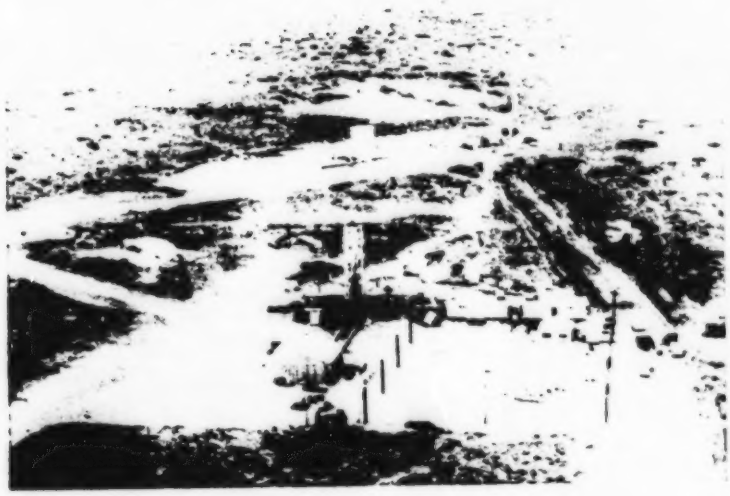
Le lieu à la surface est aussi important; les événements sismiques qui se produisent à des endroits comme le fond de l'océan ne sont sûrement pas des explosions d'origine anthropique.

Il faut aussi se souvenir que de nombreuses régions peuvent sembler inactives sur le plan sismique parce que les événements à forte magnitude ne s'y produisent que très rarement. Toutefois, ces zones peuvent être très actives en ce qui concerne les événements de magnitude plus faible. Ainsi, certaines parties du Canada et des États-Unis peuvent n'enregistrer qu'un seul tremblement de terre de magnitude 4,5 à l'échelle Richter par décennie, tout en entretenant une moyenne d'un choc par jour dans l'intervalle de 2,0-3,9 à l'échelle Richter, ce qui passerait inaperçu sur les enregistreurs, sauf ceux des réseaux locaux. On peut présumer qu'il en va de même pour les nombreuses régions granitiques de l'URSS.

10 000 chocs par année

De manière générale, il faut 0,5 de magnitude Richter supplémentaire (ce qui équivaut à tri-

Figure 13 Vue d'ensemble des installations de surface au niveau du sol après l'explosion expérimentale Gnome, le 11 décembre 1961, Carlsbad (Nouveau-Mexique). (Courtoisie de Borden, Reynolds Electrical & Engineering Company Inc.)



pler la force du choc, voir figure 14), au-dessus du seuil de détection, avant de pouvoir affirmer qu'un événement donné est une explosion. Comme environ 10 000 tremblements de terre de magnitude supérieure à 4 à l'échelle Richter se produisent autour du Globe tous les ans en plus des milliers et des milliers d'événements plus petits, le processus d'identification constitue un défi de taille.

La violence d'un événement sismique est habituellement exprimée au moyen d'une échelle sans limites fixes, qui porte le nom de son inventeur, Charles Richter, et dans laquelle chaque chiffre consécutif de l'échelle correspond à un facteur ajouté de 10 dans l'ampleur de l'événement.

Pour un seuil hypothétique de 2,7 à 3,2 à l'échelle Richter et un réseau de 25 à 30 stations sismologiques régionales déployées par consentement réciproque à travers les États-Unis et l'URSS, seulement 80 p. 100 de tous les événements enregistrés entreraient probablement dans les catégories d'origine nucléaire ou naturelle. Ceci laisse donc beaucoup de place aux fausses alarmes et à la possibilité que si des essais nucléaires d'une très petite portée ou d'une portée inférieure à une kilotonne étaient menés, ils pourraient bien ne pas être identifiés.

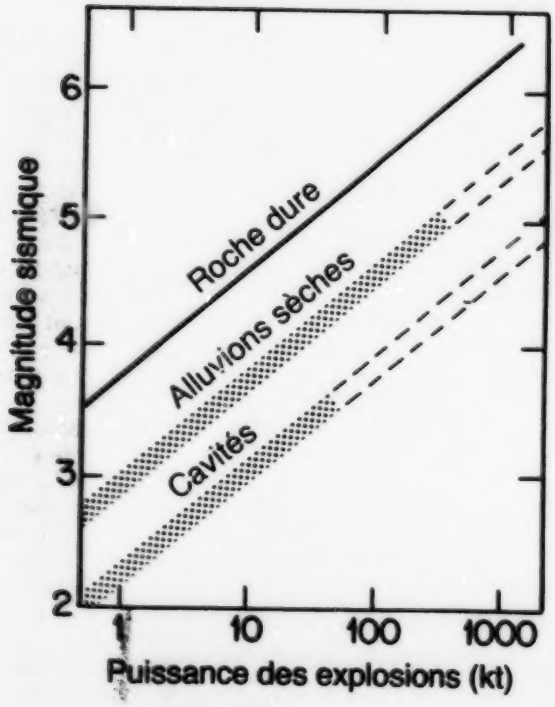
Sur la base de ce genre d'incertitudes, certains spécialistes estiment qu'il est impossible d'en venir à un traité à la fois complet et vérifiable concernant l'interdiction des essais. Ces critiques déclarent qu'aucune des technologies de surveillance envisagées actuellement ne peut offrir l'assurance absolue que des explosions nucléaires illicites de très petite puissance ne passeront pas inaperçues.

Cette lacune dans la capacité de détection et d'identification met en évidence la nécessité de mettre l'accent sur l'organisation de réseaux de détection suffisants à l'intérieur même du pays et souligne le bien-fondé de dispositions prévoyant des inspections sur place.

Le côté pratique

Les scientifiques ne manquent jamais de rappeler que bien avant la détection et l'identification des essais souterrains avec une certaine précision, il existe une autre grande considération : *le côté pratique*. Il n'est pas exagéré de prétendre que, dans la portée d'une station sismologique donnée, des milliers d'événements se produiront au

Figure 14 Magnitude sismique en fonction de la puissance des explosions pour différentes formations géologiques d'après des données qui proviennent du polygone d'essais du Nevada. Comme l'indique la figure ci-dessous, il faut environ dix fois plus de puissance pour produire une onde de choc d'une unité supérieure sur l'échelle Richter.



cours d'une année. D'après le docteur Basham, il serait impensable de chercher à les contrôler et à les analyser tous, puis à réanalyser les événements suspects en tenant compte de données complémentaires provenant d'autres sources. Mais à ce moment, nombre de scientifiques font aussi remarquer que, si l'atteinte d'un tel objectif pouvait décourager d'autres essais d'armes nucléaires, elle en vaudrait bien la peine.

La tendance aux armes nucléaires plus petites

L'importance de bien surveiller les essais d'engins de moindre puissance doit être considérée en fonction de trois progrès importants réalisés récemment en technologie avancée des armements :

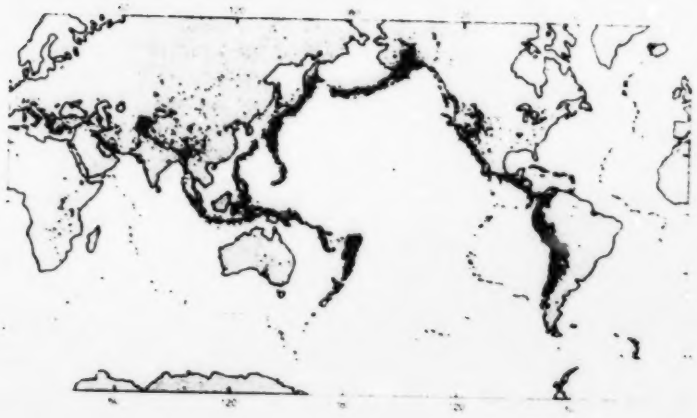
- La précision accrue qui est obtenue par les missiles nucléaires — cette précision a atteint un point tel que des explosions de plus faible puissance pourraient assurer la destruction de cibles précises;
- Les très petites armes nucléaires (équivalant à quelques tonnes d'explosifs chimiques) deviennent de plus en plus intéressantes pour ceux qui aimeraient se servir d'armes nucléaires en situation purement tactique de champ de bataille, avec un minimum de risques pour les civils du secteur et un minimum de perturbations pour l'environnement; et
- La recherche continue de mécanismes de déclenchement nucléaire à la fois plus petits, plus efficaces et plus économiques.

Bien que l'importance militaire de ces très petits essais nucléaires soit une question au sujet de laquelle le débat se poursuit, la plupart des experts semblent convenir qu'il serait relativement facile pour un pays donné de les essayer sans craindre la détection. Les essais seraient même plus faciles à réaliser dans les pays où les flux et les mouvements d'informations sont strictement contrôlés et où il existe de vastes zones d'habitat dispersé.

Une solution : les stations automatiques

Les discussions et les expériences qui sont menées tous les ans depuis 1976 par le Groupe d'experts scientifiques s'appuient toujours sur l'emploi de données généralement disponibles grâce au réseau sismologique mondial. Les discussions tenues entre le Royaume-Uni, les États-Unis et l'URSS au cours de la période 1976-1980 ont indiqué une volonté de la

Figure 15 Répartition des tremblements de terre dans le monde entier (de magnitude supérieure à 4,5) sur une période de 7 ans.



part de ces pays de permettre la mise en place de certains dispositifs automatiques, appelés parfois «boîtes noires», à l'intérieur même de leurs territoires. Une fois intervenu entre les États-Unis et l'URSS un accord de principe concernant la mise en place de stations automatiques à l'intérieur de leurs limites réciproques, les scientifiques américains ont commencé à imaginer un prototype de station automatique permettant de renvoyer des données en continu vers les États-Unis par satellite.

Le recours à de telles stations automatiques modifie toute la nature du problème de surveillance. Il met aussi en évidence le rôle potentiel du Canada dans la création de technologies appropriées à cette nouvelle situation. La question-clé est maintenant de savoir : comment est-il possible de bien surveiller des événements dont on peut maintenant s'approcher?

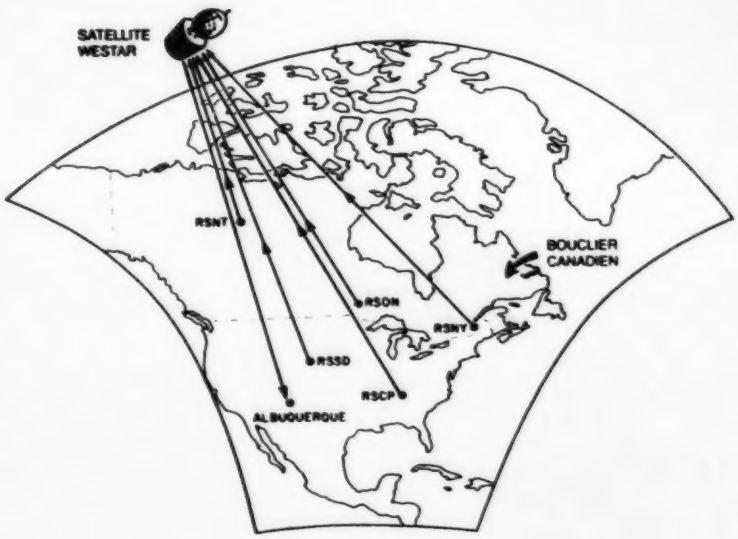
Comme Peter Basham s'empresse de le faire remarquer, la réponse n'est pas toute simple. Une onde sismique qui a voyagé sur une grande distance à travers le manteau de la Terre, même si elle a perdu une partie de sa force pendant sa course, possède une signature sismique relativement simple. Par contre, un choc qui n'a voyagé que sur 500 à 1 000 kilomètres peut avoir une forme d'onde complexe, parce qu'il aura rencontré dans la croûte terrestre une myriade de complexités locales qui engendrent des signaux faibles mais qu'il est tout de même possible d'enregistrer localement.

Le Canada prend alors une importance nouvelle en ce qui concerne les recherches en cours parce que sa plus grande partie repose sur une immense masse de roches anciennes. Cette masse porte le nom de bouclier précambrien et celui-ci présente des affinités géologiques certaines avec les grandes masses de roches continentales sur lesquelles repose la plus grande partie du continent eurasiatique. C'est ainsi que le Canada, du point de vue géophysique, ressemble à l'URSS et constitue de ce fait un champ d'expérimentation permettant d'en apprendre beaucoup au sujet des techniques sismologiques rapprochées qui sont susceptibles de s'appliquer à un réseau télécommandé à l'intérieur de l'URSS. De plus, les sismographes canadiens sont relativement près du polygone d'essais du Nevada tout en étant sur la même masse continentale; le Nevada est la région choisie pour la plupart des essais des États-Unis (voir fig. 3).

Entre-temps, les États-Unis qui cherchent à prendre de l'expérience dans la capacité d'exploitation et la capacité opérationnelle de leur nouvelle station télécommandée, ont mis en place sur le continent nord-américain, un réseau de cinq unités, sous le nom de *Regional Seismic Test Network*. À la suite d'accords entre les deux pays, deux de ces unités se trouvent au Canada. Une d'entre elles est située à Red Lake (Ontario) tandis que la seconde se trouve près de Yellowknife, à proximité de l'ensemble canadien. Il sera donc possible de comparer le rendement respectif des deux stations de Yellowknife qui sont tout à fait différentes.

Figure 16 Prototype étatsunien de station sismologique automatique de surface dans les Adirondacks, renfermant du matériel d'émission-réception ainsi qu'une antenne pour les communications par satellite avec le système RSTN (voir fig. 17) (Courtoisie des Sandia National Laboratories, Albuquerque, Nouveau-Mexique.)

Figure 17 **Le *Regional Seismic Test Network*.** Les stations du bouclier canadien à Yellowknife (RSTN) et à Red Lake, Ontario (RSON) sont exploitées dans le cadre d'une coopération entre le ministère canadien de l'Énergie, des Mines et des Ressources d'une part et le département de l'Énergie des États-Unis. Les données sismiques sont transmises à Albuquerque (Nouveau-Mexique) par le satellite WESTAR.



Le chemin qui reste à faire

Chapitre sept

Le chemin qui reste à faire

Ce type de données rapprochées constitue peut-être un élément-clé pour accroître notre capacité d'identifier des événements plus petits. À l'heure actuelle, les sismologues n'en savent pas beaucoup au sujet du mode de propagation des ondes énergétiques de fréquence plus élevée à travers la croûte terrestre. Par conséquent, une des questions sur lesquelles ils se pencheront est celle de la possibilité que les ondes P de fréquence beaucoup plus élevée que les ondes dont on s'est servi auparavant pourraient être utilisées pour identifier des événements nucléaires à faible énergie, même si ces ondes ont tendance à faiblir rapidement avec la distance.

M. North fait remarquer qu'aucune détonation nucléaire ou détonation délibérée d'explosifs classiques ne sera nécessaire au cours de cette recherche canadienne. Il existe un grand nombre de petits tremblements de terre, de coups de mines et de coups de charge provenant de sources diverses qui peuvent être utilisés.

Il reste vrai que la tâche de vérification, déjà assez complexe, sera encore accrue si un plus grand nombre de données rapprochées doivent aussi être analysées.

Le facteur décisif

La plupart des scientifiques qui ont étudié ces questions conviennent que, d'un point de vue technique, n'importe quel traité visant à interdire les essais nucléaires doit s'appuyer sur un désir sincère de la part de toutes les parties, de le rendre opérant. Il serait extrêmement facile pour n'importe quel pays dans à peu près n'importe quelle partie du monde de procéder à l'essai d'engins nucléaires sous-kilotonniques sans craindre d'être détecté, même si des capteurs internationaux étaient déployés à l'intérieur de son propre territoire. Quant à savoir si un facteur semblable constitue un obstacle à des négociations réussies concernant une interdiction des essais nucléaires souterrains, cela reste une question que les politiciens et les diplomates, plutôt que les scientifiques, devraient être en meilleure position de trancher.

Figure 18 Principales étapes des négociations et des initiatives internationales visant à interdire et à réglementer l'utilisation des armes nucléaires.

1946	*Plan étatsunien Baruch pour garantir que les armes atomiques ne sont employées qu'à des fins pacifiques.
1955	*Plan soviétique pour le désarmement général et complet ainsi qu'une interdiction de tous les essais d'armes nucléaires.
1958 (été)	*La première rencontre des experts en sismologie à Genève donne lieu à des recommandations pour l'implantation d'un réseau sismologique mondial et d'un système d'inspection sur place.
1958 (automne)	*Des négociations trilatérales (États-Unis, Royaume-Uni, URSS) au sujet d'un traité d'interdiction des essais conduisent à un accord sur un moratoire des essais nucléaires.
1959	*La France, les États-Unis, le Royaume-Uni et l'URSS signent un traité (maintenant signé par 32 pays) interdisant les essais nucléaires dans l'Antarctique.
1961	*Le moratoire sur les essais nucléaires se termine lorsque l'URSS fait détoner la plus grosse explosion nucléaire jamais enregistrée (58 mégatonnes).

1963	*L'Inde, le Royaume-Uni, les États-Unis et l'URSS signent le Traité sur l'interdiction partielle des essais (maintenant signé par 111 pays) interdisant les essais nucléaires dans les océans, l'atmosphère et l'espace extra-atmosphérique.
1967	*La France, l'Inde, le Royaume-Uni, les États-Unis et l'URSS signent le Traité sur l'espace extra-atmosphérique (aujourd'hui signé par 92 pays) interdisant le stationnement dans l'espace d'armes nucléaires ou d'autres armes de destruction massive.
1967	*Vingt-neuf pays latino-américains signent le Traité de Tlatelolco interdisant les armes nucléaires en Amérique latine.
1968	*Le Royaume-Uni, les États-Unis et l'URSS signent le Traité sur la non-prolifération des armes nucléaires (aujourd'hui signé par plus de 127 pays) en vue d'empêcher l'augmentation du nombre d'armes nucléaires et pour décourager leur distribution aux autres pays.

1971	*Le Royaume-Uni, les États-Unis et l'URSS signent le Traité concernant le fond des mers (aujourd'hui signé par 81 pays) lequel interdit de placer des armes nucléaires sur le fond des mers.
1974	*Les États-Unis et l'URSS signent le Traité sur l'interdiction des essais dépassant un certain seuil (non ratifié) qui interdit les essais nucléaires souterrains d'une puissance supérieure à 150 kilotonnes.
1976	*Les États-Unis et l'URSS signent un Traité sur les explosions nucléaires à des fins pacifiques (non ratifié) afin d'établir des règles appropriées pour régir les explosions souterraines à des fins pacifiques.